



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**OPTIMISASI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING*
MENGUNAKAN *FIREFLY ALGORITHM* PADA
PHOTOVOLTAIC SYSTEM UNTUK MOBIL SURYA**

Dwi Didit Prasetyo
NRP 2210100165

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**OPTIMISASI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING*
MENGUNAKAN *FIREFLY ALGORITHM* PADA
PHOTOVOLTAIC SYSTEM UNTUK MOBIL SURYA**

Dwi Didit Prasetyo
NRP 2210100165

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**MAXIMUM POWER POINT TRACKING OPTIMIZED BY
FIREFLY ALGORITHM ON PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR
SOLAR CAR**

Dwi Didit Prasetyo
NRP 2210 100 165

Supervisor
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**OPTIMISASI MAXIMUM POWER POINT TRACKING
MENGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM PADA
PHOTOVOLTAIC SYSTEM UNTUK MOBIL SURYA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

NIP. 1963 08 17 1990 03 1001

Heri Suryatmojo, ST, MT, Ph.D.

NIP. 1980 06 03 2006 04 1003



Optimisasi *Maximum Power Point Tracking* Menggunakan *Firefly Algorithm* Pada *Photovoltaic System* Untuk Mobil Surya

Dwi Didit Prasetyo
2210 100 165

Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.

Dosen Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

Abstrak:

Maximum Power Point Tracking merupakan metode untuk menghasilkan keluaran daya terbesar pada *photovoltaic system*. Prinsip kerja MPPT adalah mengatur nilai daya keluaran PV (*photovoltaic*) sehingga mendekati nilai maksimum. Pengaturan dan optimasi nilai daya menggunakan *Firefly Algorithm* yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang. Proses *tunning* menggunakan *PID Controller*. Parameter yang diatur dan dioptimisasi adalah daya keluaran. Nilai ini didapatkan dari perkalian antara nilai tegangan dan nilai arus. Nilai daya ini dibandingkan dengan nilai daya maksimum PV. Output dari MPPT adalah *duty cyle* yang berfungsi mengatur *Boost Converter* agar menghasilkan daya pada daerah operasi maksimum.

Simulasi dijalankan dengan Matlab Simulink. PV *system* yang digunakan adalah PV pada mobil surya yang berfungsi sebagai sumber daya. Pada simulasi tersebut dibandingkan seberapa besar pengaruh *firefly algorithm* pada daya keluaran PV. Faktor rugi daya dan faktor ekonomis diabaikan pada simulasi ini.

Kata kunci: *Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic System, Firefly Algorithm, Duty Cyle, Boost Converter*



Maximum Power Point Tracking Optimized by Firefly Algorithm on Photovoltaic System for Solar Car

Dwi Didit Prasetyo
2210 100 165

Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

Supervisor II : Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

Abstract:

Maximum Power Point Tracking (MPPT) is the way to get the maximum power on photovoltaic system. The principal of MPPT is set up the output value of photovoltaic power to approach the maximum value of solar module specification. This optimization is using firefly algorithm that inspired by firefly characteristic. Proportional, Integral, Derivative Controller (PID Controller) is used for tuning purpose. It set up the power output which gets from best voltage value. This system uses boost converter. It uses to increase the voltage to the value that have been set. This power output is compared to the maximum power of photovoltaic system. PID controller is used to control the duty cycle value. It work based on firefly algorithm. So, photovoltaic system can work on maximum power.

This simulation is running on Simulink. The result is a comparison of PV system under various sun irradiance and load. This PV power is used for solar car. The analytical data is shown to prove that PV system can works on maximal power with firefly algorithm. Power loss and economical factor is ignored in this simulation.

Keywords : *Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic System, Firefly Algorithm, Duty Cycle, Boost Converter*



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah yang telah memberikan pertolongan dan kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

Optimisasi *Maximum Power Point Tracking* Menggunakan *Firefly Algorithm* Pada *Photovoltaic System* Untuk Mobil Surya

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang studi teknik sistem tenaga Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, terutama kepada :

1. Kedua orang tua yang telah memberikan doa, motivasi, bimbingan, dan nasehat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, kritik, saran dan motivasi kepada penulis saat menjadi anggota laboratorium PSOC maupun selama menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan koreksi kepada penulis mulai dari analisis data, penyusunan proposal sampai penyelesaian dari Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Kajar Teknik Elektro ITS dan seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan bimbingan dan ilmu pengetahuan selama perkuliahan.
5. Sahabat dan rekan saya Rian Wahyu, Suharto, Rodhi, Mas Tufiq Ramadhan, Mas Herlambang Setiadi, Mas Fani, Mas Candra P, Mas Afif, Mas Wandu, Ibu Hidayatul Nurrohman, Bapak Otong, Bapak Aji, Bapak Andi Imran, Bapak Dani, teman-teman e50 dan semua teman-teman laboratorium PSOC yang telah membantu memberi saran, kritikan, dan motivasi serta bersedia berdiskusi selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis berharap semoga apa yang ada dalam Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca terutama mahasiswa Teknik Elektro.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	1
1.3. Permasalahan	2
1.4. Batas Masalah	2
1.5. Metode Penelitian	2
1.6. Sistematika Penulisan	3
1.7. Relevansi	3
BAB 2 TEORI PENUNJANG	5
2.1. <i>Photovoltaic</i> (PV)	5
2.1.1. Rangkain Ekvivalen PV	7
2.1.2. Kurva Karakteristik PV	7
2.2. <i>Boost Converter</i>	10
2.3. <i>Maximum Power Point Tracking</i>	13
2.4. <i>Firefly Algorithm</i> (Algoritma Kunang-Kunang)	14
2.4.1. <i>Attractiveness</i> (Daya Tarik)	14
2.4.2. <i>Distance</i> (Jarak)	15
2.4.3. <i>Movement</i> (Pergerakan Kunang-Kunang)	15
2.5. MPPT Menggunakan <i>Firefly Algorithm</i>	16
2.6. Kontroler PID	16
2.3.1. Kontroler Proporsional	16
2.3.2. Kontroler Integral	17
2.3.3. Kontroler Diferensial	17
2.8. Mobil Surya (<i>Solar Car</i>)	19

BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA	23
3.1. Metodologi Penelitian	23
3.2. Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan	24
3.2.1. Pemodelan PV	25
3.2.2. Pemodelan Boost Converter	27
3.2.2. Pemodelan Photovoltaic System	29
3.2.4. <i>Pulse Wave Modulation</i> Untuk <i>Boost Converter</i>	30
3.3. Metode <i>Firefly Algorithm</i>	30
3.4. Simulasi Sistem	36
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	41
4.1. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 12.5 Ω	42
4.2. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 15 Ω	46
4.3. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 17.5 Ω	50
4.4. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 20 Ω	54
4.5. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Semua Nilai Beban	58
4.6. Analisis dan Perbandingan <i>Error</i> Daya PV Pada Semua Nilai Beban	62
BAB 5 PENUTUP	65
5.1. Kesimpulan	65
5.2. Saran	
DAFTAR PUSTAKA	xix
INDEKS	xxi
RIWAYAT HIDUP	xxiii

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi PV Untuk Mobil Suryawangsa	20
Tabel 3.1 Spesifikasi modul PV	25
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>boost converter</i>	28
Tabel 3.3 Parameter <i>Firefly Algorithm</i>	32
Tabel 3.4 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 12,5 Ohm	33
Tabel 3.5 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 15 Ohm	34
Tabel 3.6 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 17,5 Ohm	35
Tabel 3.7 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 20 Ohm	35
Tabel 4.1 Data karakteristik daya PV	41
Tabel 4.2 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 12,5 Ohm	43
Tabel 4.3 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 12,5 Ohm	44
Tabel 4.4 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 15 Ohm	47
Tabel 4.5 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 15 Ohm	48
Tabel 4.6 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 17,5 Ohm	51
Tabel 4.7 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 17,5 Ohm	53
Tabel 4.8 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 20 Ohm	55
Tabel 4.9 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 20 Ohm	56
Tabel 4.10 Perbandingan daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban	59
Tabel 4.11 Perbandingan daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban	61
Tabel 4.12 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban	62
Tabel 4.13 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban	64



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Sederhana dari PV	7
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Kompleks dari PV	7
Gambar 2.3 <i>Open Circuit Voltage</i> dan <i>Short Circuit Voltage</i>	8
Gambar 2.4 Kurva karakteristik PV	8
Gambar 2.5 Pengaruh beban yang bervariasi terhadap daya keluaran <i>photovoltaic</i>	9
Gambar 2.6 Pemasangan <i>photovoltaic</i> secara seri	9
Gambar 2.7 Pemasangan PV secara paralel	10
Gambar 2.8 Rangkaian <i>Boost Converter</i>	10
Gambar 2.9 <i>Boost Converter</i> dalam kondisi saklar terhubung	11
Gambar 2.10 <i>Boost Converter</i> dalam kondisi saklar terbuka	12
Gambar 2.11 Prinsip Kerja MPPT	13
Gambar 2.12 Blok diagram sinyal kontroler proporsional	17
Gambar 2.13 Modulasi sinyal PWM pada <i>boost converter</i>	18
Gambar 2.14 Membangkitkan sinyal PWM dengan sinyal gigi gergaji	19
Gambar 2.15 Mobil Listrik Suryawansa	19
Gambar 3.1 Metodologi Penelitian	24
Gambar 3.2 MPPT berbasis PID dengan <i>Firefly Algorithm</i>	25
Gambar 3.3 Pemodelan <i>photovoltaic</i>	26
Gambar 3.4 Kurva V-I pada berbagai nilai <i>irradiance</i> dari 100 W/m ² sampai 1000 W/m ²	27
Gambar 3.5 Kurva P-V pada berbagai nilai <i>irradiance</i> dari 100 W/m ² sampai 1000 W/m ²	27
Gambar 3.6 Permodelan <i>Boost Converter</i>	28
Gambar 3.7 <i>Photovoltaic System</i> menggunakan <i>boost converter</i>	29
Gambar 3.8 Diagram alur metode <i>firefly algorithm</i>	31
Gambar 3.9 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 12.5 Ω	32
Gambar 3.10 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 15 Ω	33
Gambar 3.11 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 17,5 Ω	34
Gambar 3.12 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 20 Ω	35
Gambar 3.13 Blok diagram perbandingan MPPT	37

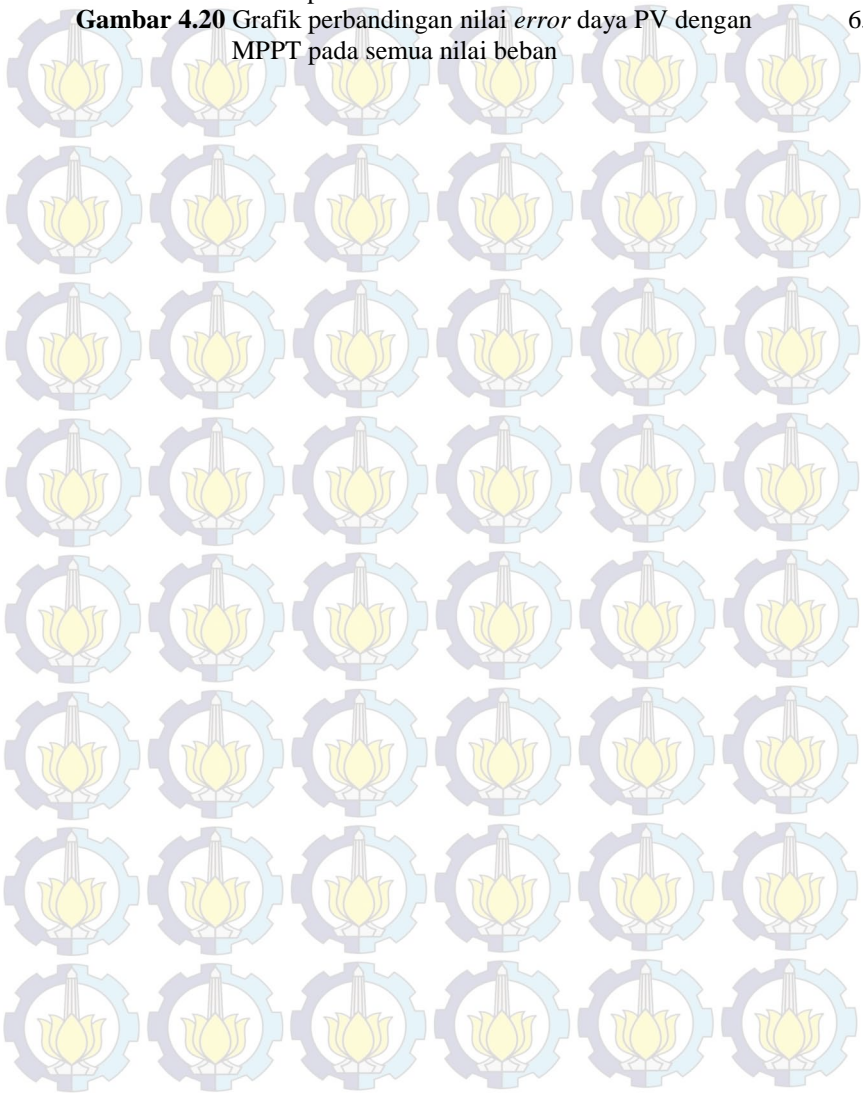
Gambar 3.14	Pemodelan MPPT berbasis <i>PID controller</i> dengan <i>firefly algorithm</i>	38
Gambar 3.15	Diagram blok MPPT pada Matlab Simulink	39
Gambar 3.16	Kurva karakteristik PV	39
Gambar 4.1	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 12.5 Ω	42
Gambar 4.2	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 12.5 Ω	44
Gambar 4.3	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 12,5 Ω	45
Gambar 4.4	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 12.5 Ω	46
Gambar 4.5	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 15 Ω	47
Gambar 4.6	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 15 Ω	48
Gambar 4.7	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 15 Ω	49
Gambar 4.8	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 15 Ω	50
Gambar 4.9	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 17.5 Ω	51
Gambar 4.10	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 17,5 Ω	52
Gambar 4.11	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 17.5 Ω	53
Gambar 4.12	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 17,5 Ω	54
Gambar 4.13	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 20 Ω	55
Gambar 4.14	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 20 Ω	56
Gambar 4.15	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 20 Ω	57
Gambar 4.16	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 20 Ω	58
Gambar 4.17	Grafik perbandingan nilai daya tanpa MPPT pada semua nilai beban	60
Gambar 4.18	Grafik perbandingan nilai daya dengan MPPT pada semua nilai beban	61

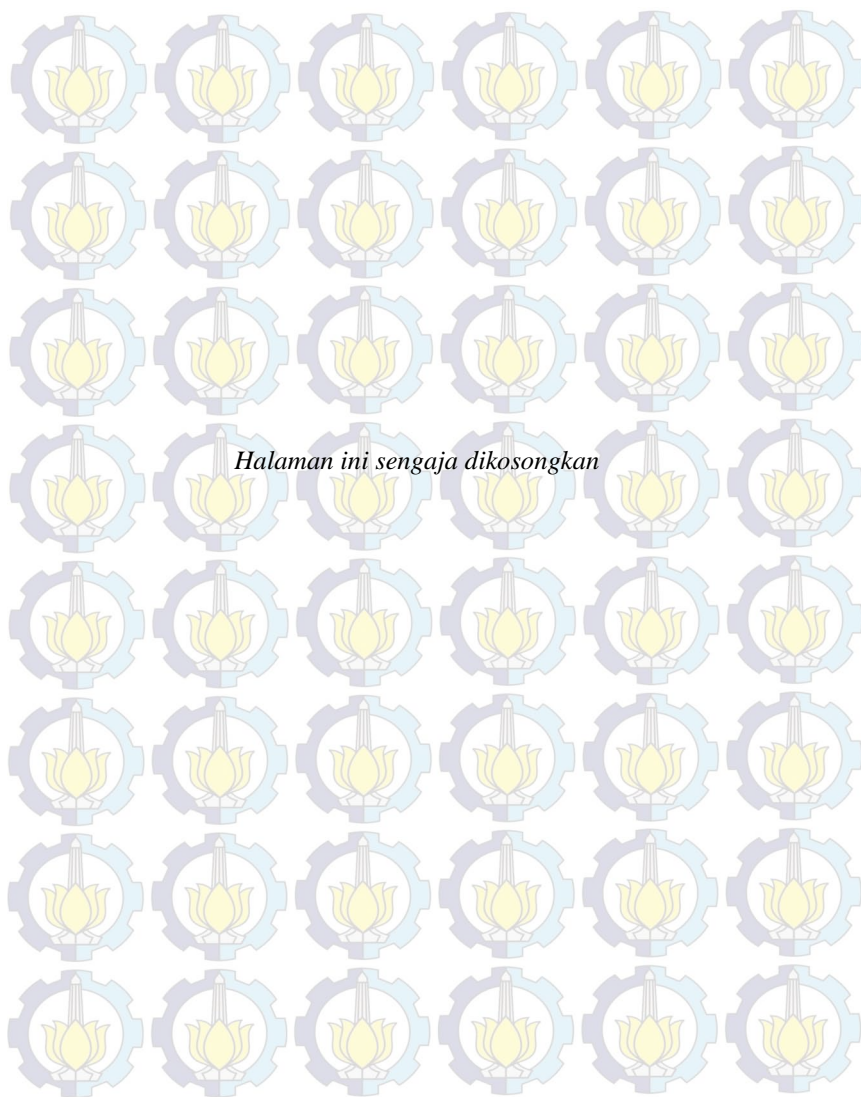
Gambar 4.19 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

63

Gambar 4.20 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

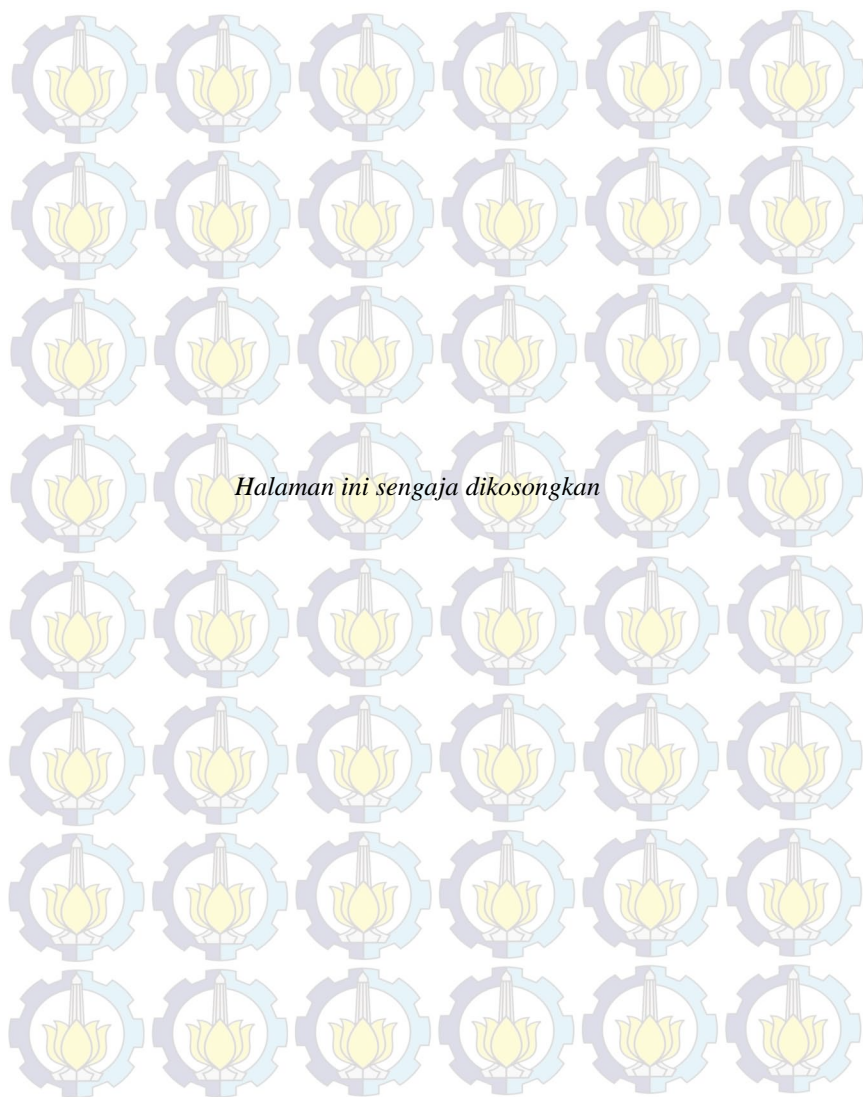
65





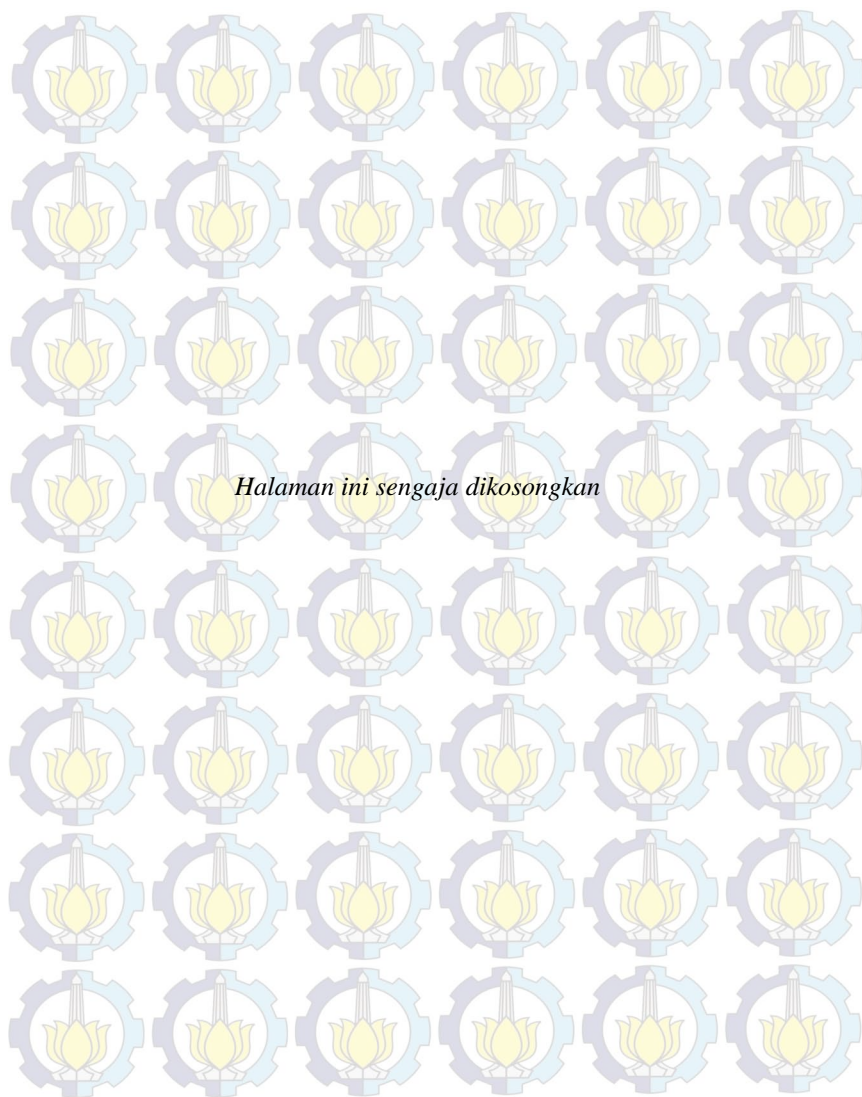
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

PV	: Photovoltaic
PID	: Proportional Integral Differential
FA	: Firefly Algorithm
ITAE	: Integral Time Absolute Error
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
MPP	: Maximum Power Point (Titik daya maksimum)
k	: Duty Cycle
T	: Temperature
I_D	: Arus dioda
R_s	: Hambatan seri
I_L	: Hambatan parallel
V	: Tegangan
V_s	: Tegangan sumber
V_R	: Tegangan resistor
V_L	: Tegangan beban
V_{oc}	: Tegangan open circuit
I	: Arus
I_{sc}	: Arus short circuit
FF	: Fill Factor
P	: Daya
P_{max}	: Daya maksimal PV
P_{mppt}	: Daya keluaran MPPT
$P_{uncontrolled}$: Daya keluaran tanpa MPPT
T	: Periode
t_{on}	: Waktu saklar terhubung
t_{off}	: Waktu saklar terbuka
C	: Kapasitor
L	: Induktor
ΔI	: Perubahan arus
ΔV	: Perubahan tegangan
R	: Resistor
K_p	: Konstanta proportional
K_i	: Konstanta integral
K_d	: Konstanta differential



DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

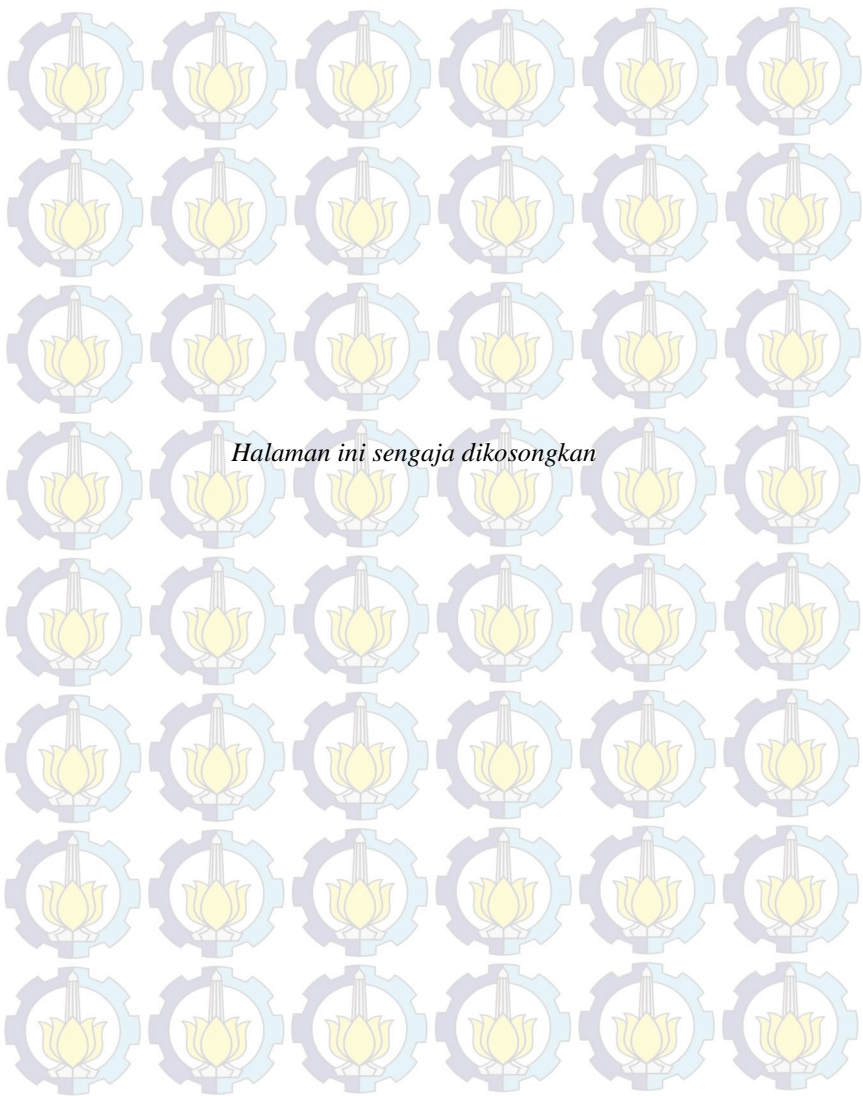
PV	: Photovoltaic
PID	: Proportional Integral Differential
FA	: Firefly Algorithm
ITAE	: Integral Time Absolute Error
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
MPP	: Maximum Power Point (Titik daya maksimum)
k	: Duty Cycle
T	: Temperature
I_D	: Arus dioda
R_s	: Hambatan seri
I_L	: Hambatan parallel
V	: Tegangan
V_s	: Tegangan sumber
V_R	: Tegangan resistor
V_L	: Tegangan beban
V_{oc}	: Tegangan open circuit
I	: Arus
I_{sc}	: Arus short circuit
FF	: Fill Factor
P	: Daya
P_{max}	: Daya maksimal PV
P_{mppt}	: Daya keluaran MPPT
$P_{uncontrolled}$: Daya keluaran tanpa MPPT
T	: Periode
t_{on}	: Waktu saklar terhubung
t_{off}	: Waktu saklar terbuka
C	: Kapasitor
L	: Induktor
ΔI	: Perubahan arus
ΔV	: Perubahan tegangan
R	: Resistor
K_p	: Konstanta <i>proportional</i>
K_i	: Konstanta <i>integral</i>
K_d	: Konstanta <i>differential</i>



RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama lengkap Dwi Didit Prasetyo adalah anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Mariyoto dan Ibu Siti Maftuchah, yang lahir di Bojonegoro, 13 Agustus 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan sekolah dasar di SDN Sambeng 2 Kecamatan Kasiman, Bojonegoro. Setelah lulus sekolah dasar tahun 2004, penulis melanjutkan sekolah ke SMP Negeri 2 Cepu, Kabupaten Blora dan lulus tahun 2007. Kemudian, penulis melanjutkan sekolah di SMA 1 Cepu, Kabupaten Blora. Setelah lulus dari SMA 1 Cepu pada tahun 2010, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Teknik Elektro dan mengambil konsentrasi bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis juga aktif dalam berbagai kegiatan selama menempuh studi S1 yaitu BEM ITS dan anggota dari Laboratorium PSOC (*Power System Operation and Control*) Teknik Elektro ITS. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email : dwi.didit.prasetyo10@mhs.ee.its.ac.id.



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan manusia akan kendaraan atau transportasi menjadi sangat penting untuk mendukung kehidupan sehari-hari. Dengan semakin meningkatnya kebutuhan transportasi, maka tentu saja penggunaan energi juga meningkat. Sumber energi yang terbatas seperti minyak bumi, mendorong diperlukannya inovasi untuk menemukan energi alternatif demi mengatasi permasalahan krisis energi di masa depan. Keberadaan sumber energi matahari yang melimpah merupakan solusi energi alternatif yang layak untuk dipertimbangkan. Mobil surya merupakan salah satu cara untuk memaksimalkan potensi energi matahari yang melimpah. Dengan optimisasi daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic system*, kinerja mobil surya juga dapat lebih baik.

Mobil surya memiliki permasalahan pada performa daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic*. Daya yang dihasilkan seringkali tidak stabil jika suhu dan intensitas matahari juga tidak stabil. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode untuk memaksimalkan daya keluaran dari *photovoltaic*. Untuk memaksimalkan daya listrik yang dihasilkan diperlukan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT ini juga perlu dioptimisasi. Output dari MPPT ini adalah *duty cycle* yang digunakan untuk mengatur kerja dari Boost Converter.

Firefly Algorithm digunakan untuk memaksimalkan *output* daya agar berada pada daerah maksimum (*Maximum Power Point*). Parameter *firefly algorithm* akan diatur sedemikian rupa menggunakan *Proportional, Integral, and Derivative Controller* (*PID Controller*). *Firefly algorithm* terinspirasi oleh perilaku kunang-kunang. Kombinasi antara *firefly algorithm* dan *PID controller* menentukan nilai *duty cycle*. Nilai inilah yang mempengaruhi daya keluaran dari *photovoltaic*.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Menentukan permodelan MPPT berbasis *PID controller* yang nilai parameter K_p , K_i , dan K_d ditala dengan *firefly algorithm*.

2. Mendapatkan perbandingan daya keluaran antara *photovoltaic system* menggunakan MPPT dan tanpa MPPT dalam berbagai kondisi intensitas cahaya matahari dan berbagai nilai beban.

1.3 Permasalahan

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana menentukan permodelan MPPT berbasis *PID controller* yang dioptimisasi menggunakan *firefly algorithm*.
2. Bagaimana perbandingan daya keluaran antara *photovoltaic system* tanpa MPPT dan dengan MPPT dalam berbagai kondisi intensitas cahaya matahari dan pada berbagai nilai beban.

1.4 Batasan Masalah

Batas masalah dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem menggunakan *PID controller*
2. *Irradiance* berubah-ubah dan temperatur konstan 25°C
3. Perubahan beban dari 12,5 Ω sampai 20 Ω
4. Faktor ekonomis tidak diperhitungkan
5. Simulasi menggunakan Matlab Simulink dan PSIM yang diintegrasikan dengan *SIM Coupler*
6. Faktor rugi daya diabaikan
7. Faktor *ripple* diabaikan

1.5 Metode Penelitian

Pada Tugas Akhir ini ditentukan permodelan MPPT beserta parameter yang akan dioptimisasi. Daerah operasi maksimum digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan daya maksimal pada sistem. Rangkaian *schematic* dibuat pada PSIM dan *firefly algorithm* dijalankan pada Matlab Simulink. Dengan menentukan daya maksimal *photovoltaic*, maka diperoleh daya keluaran rata-rata yang harus dihasilkan dengan MPPT.

Nilai tegangan dan nilai arus dioptimisasi menggunakan *firefly algorithm*. Algoritma ini bekerja dengan cara eksplorasi dan eksploitasi semua parameter yang ada. *PID controller* digunakan sebagai parameter *controller* agar pencarian berada pada solusi optimal. Rangkaian *photovoltaic system* pada simulink terdiri dari modul *photovoltaic*, *boost-converter*, dan beban resistor.

Pada Simulink terdapat blok diagram PID controller yang dihubungkan dengan *boost converter*. Sistem disimulasikan untuk mendapatkan perbandingan daya keluaran antara *photovoltaic system* tanpa MPPT dan dengan MPPT dalam berbagai kondisi intensitas cahaya matahari dan berbagai nilai beban.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut,

Bab 1 : Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2 : Dasar teori yang merupakan penjelasan teori mengenai *photovoltaic module*, *boost converter*, *firefly algorithm*, *PID controller*, dan mobil surya

Bab 3 : Penjelasan teori tentang optimisasi MPPT dengan *firefly algorithm*.

Bab 4 : Hasil simulasi, analisis dan perbandingan *photovoltaic system* tanpa MPPT dan dengan MPPT

Bab 5 : Kesimpulan Tugas Akhir yang mengemukakan kesimpulan dari hasil pembahasan dan mengemukakan saran-saran sehubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut.

1. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan sistem sumber daya mobil surya
2. Dapat meningkatkan penguasaan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di bidang sistem tenaga bagi pengusul Tugas Akhir.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa sebagai Tugas Akhir.



BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Photovoltaic (PV)

PV dapat bekerja dengan adanya sinar matahari. PV terdiri dari peralatan semikonduktor dioda. PV bekerja menggunakan prinsip p-n junction, yaitu *junction* antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan elektron (muatan negatif) sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan *hole* (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan *hole* tersebut dapat terjadi dengan mendoping material dengan atom. Sebagai contoh untuk mendapatkan material silikon tipe-p, silikon didoping oleh atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon tipe-n, silikon didoping oleh atom fosfor.

Ketika ada cahaya yang menyentuh PV akan diserap oleh bahan semikonduktor dan terjadi pelepasan electron melalui *p-n junction semiconductor*. Elektron akan melewati lapisan bahan semikonduktor yang berbeda yang menyebabkan terjadinya perubahan sigma gaya pada bahan. Gaya tolak antar bahan semikonduktor menyebabkan aliran medan listrik dan menyebabkan elektron dapat disalurkan ke saluran awal dan akhir untuk digunakan pada peralatan listrik, sehingga terbangkit arus *Direct Current* (DC) [5].

PV memiliki berbagai macam kelebihan dan kekurangan. Kelebihan PV antara lain :

1. Sangat praktis dan cepat dalam hal perencanaan sampai dengan instalasi
2. Berbentuk modul sehingga sangat mudah dalam hal modifikasi untuk mendapatkan daya yang sesuai.
3. Perawatan sangat mudah.

Selain memiliki kelebihan, PV juga memiliki beberapa kekurangan, antara lain:

1. PV tidak dapat bekerja di malam hari sehingga membutuhkan tambahan kompoenen baterai sebagai media penyimpanan dan digunakan pada malam hari ketika tidak ada cahaya matahari.

2. Harga PV relatif mahal sehingga dibutuhkan biaya investasi yang besar

PV memiliki berbagai macam jenis yang digolongkan berdasarkan pada teknologi pembuatannya.

1. *Monocrystalline*

PV jenis ini merupakan jenis yang terbuat dari batangan kristal silikon murni yang dibelah atau diiris secara tipis-tipis. Kepingan-kepingan ini dibuat identik satu sama lain dan disusun menjadi satu sehingga menjadi satu buah modul PV. Efisiensi PV jenis ini adalah sekitar 15%-20%. PV jenis ini termasuk mahal harganya karena harga bahan baku kristal silikon murni juga mahal. Sel surya jenis ini umumnya berbentuk bulat atau segi enam sehingga jika disusun menjadi satu buah modul PV akan menyisakan banyak ruang kosong.

2. *Polycrystalline*

PV jenis ini terbuat dari bahan kristal silikon yang dileburkan kemudian dituangkan ke cetak dalam bentuk persegi. Hasil dari proses ini menyebabkan sel surya memiliki sifat tidak identik. Bentuknya yang persegi menyebabkan modul PV jenis ini tidak memiliki ruang kosong sama sekali. Efisiensi modul PV ini sekitar 13%-16%. Harganya relative lebih murah karena proses pembuatannya lebih mudah daripada jenis *monocrystalline*.

3. *Thin Film Solar Cell (TSFC)*

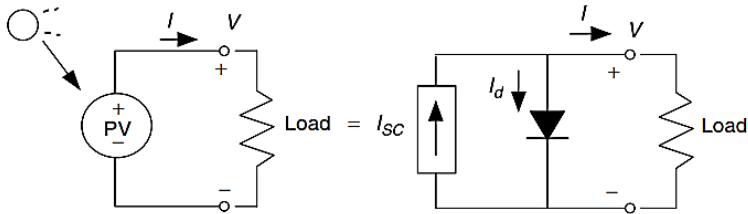
PV jenis TSFC memiliki lapisan khusus berupa lapisan material yang tipis dan fleksibel. Berdasarkan meterialnya sel surya jenis ini di bedkan menjadi beberapa jenis antara lain, *Amorphous Silicon* (a-Si), *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS), dan *Cadmium Telluride* (CdTe).

Teknologi produksi sel surya jenis *thin film* tergolong masih baru dan kemungkinan banyak digunakan di masa mendatang karena bentuknya yang tipis, ringan, dan fleksibel sehingga dapat dilekatkan pada berbagai bentuk permukaan. *Silicon Amorf* (a-Si) telah banyak digunakan sebagai bahan sumber energy pada kalkulator karena kualitasnya yang baik terutama dalam penyimpanan energi. Walaupun secara kinerja daya lebih rendah dibanding jenis (c-Si), namun hal ini bukan merupakan faktor penting karena kemampuan penyimpanan energi merupakan factor yang lebih penting bagi kinerja kalkulator. Di masa

depan aplikasi sel surya akan lebih beragam dalam berbagai alat-alat yang seringkita gunakan sehari-hari.

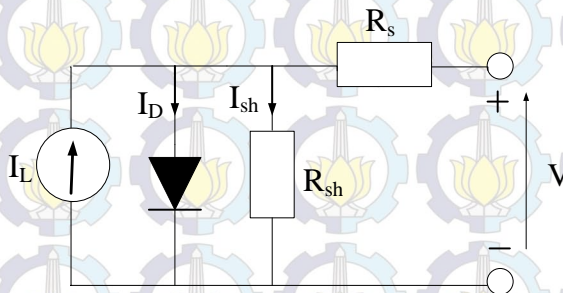
2.1.1 Rangkaian Ekuivalen PV

Sebuah PV dapat dimodelkan secara sederhana dengan sebuah sumber arus yang dipasang paralel dengan sebuah diode seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian ekuivalen sederhana dari PV

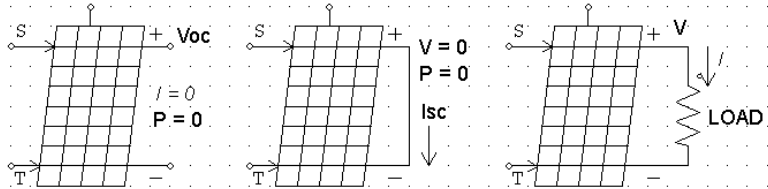
Pada rangkian PV yang lebih kompleks terdapat tambahan arus diode (I_D), hambatan seri (R_s), dan hambatan paralel (I_L)



Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen kompleks dari PV

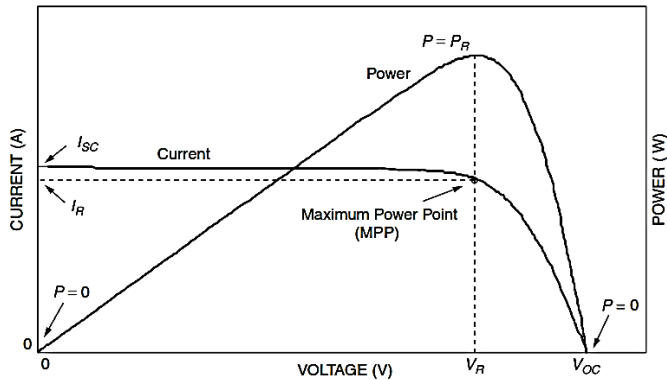
2.1.2 Kurva Karakteristik PV

Sebelum beban terhubung, modul PV menghasilkan *Open Circuit Voltage* (V_{oc}). Jika terminal *output* disambungkan, maka PV menghasilkan *Short Circuit Current* (I_{sc}). Pada kedua kondisi tidak ada beban yang terpasang seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Open Circuit Voltage dan Short Circuit Voltage*

Pengujian V_{oc} dan I_{sc} menghasilkan kurva karakteristik PV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



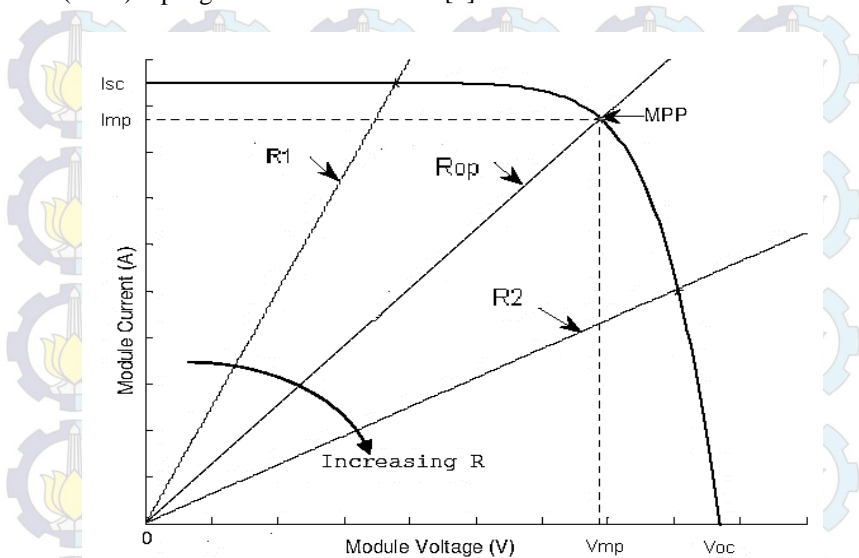
Gambar 2.4 Kurva karakteristik PV

Pada PV terdapat *Fill Factor* (FF) merupakan perbandingan antara nilai daya pada daerah operasi maksimum dengan luas persegi panjang yang dibentuk antara nilai V_{oc} dan I_{sc} . [5].

$$FF = \frac{\text{Power at Maximum Power Point}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.1)$$

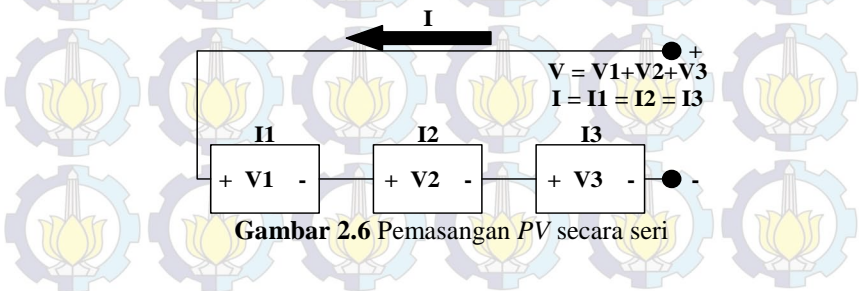
Temperatur dan intensitas cahaya matahari merupakan faktor yang berpengaruh terhadap daya keluaran PV. Nilai beban yang bervariasi dapat berpengaruh pada daya keluaran yang berbeda juga seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Beban yang berubah-ubah akan

mempengaruhi daya keluaran dari PV. Nilai *Maximum Power Point* (MPP) dipengaruhi oleh nilai beban[2].

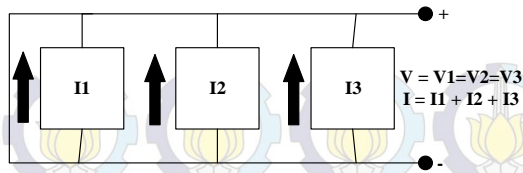


Gambar 2.5 Pengaruh beban yang bervariasi terhadap daya keluaran PV

PV dapat dipasang secara paralel maupun seri untuk mendapatkan daya keluaran yang diharapkan. Pemasangan PV secara seri dan paralel ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.



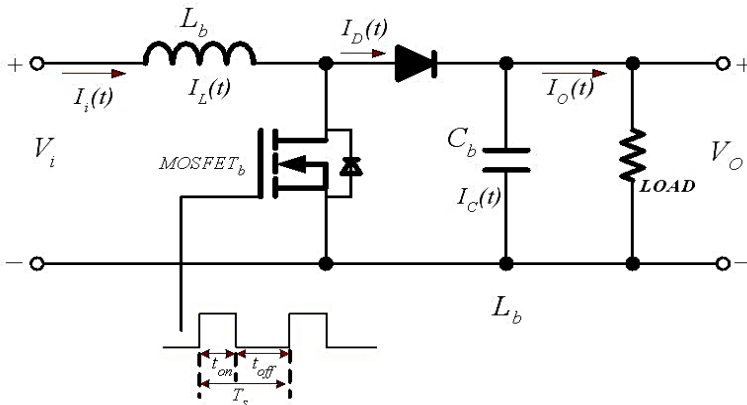
Gambar 2.6 Pemasangan PV secara seri



Gambar 2.7. Pemasangan PV secara paralel

2.2 Boost Converter

Ada berbagai macam jenis DC-DC Converter, antara lain, *Buck Converter* (menurunkan tegangan), *Boost Converter* (menaikkan tegangan), *Buck-Boost Converter* (menaikkan dan menurunkan tegangan), dan *Inverting Topology/Flyback* (membalikkan polaritas tegangan output). *Boost Converter* terdiri inductor, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET), dioda, dan kapasitor. Besar tegangan *output* dari *Boost Converter* tergantung dari *Duty Cycle*. Tegangan *output* besar daripada tegangan *input*. Sistem kerja *Boost Converter* berdasarkan pada switching MOSFET. Gambar rangkaian *Boost Converter* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



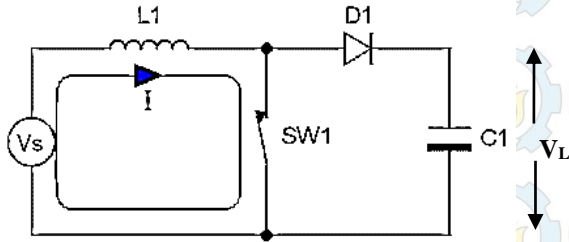
Gambar 2.8 Rangkaian *Boost Converter*

Prinsip kerja *Boost Converter* dijelaskan dalam dua mode yaitu [3] :

- Mode pengisian arus induktor (*switching* transistor dalam kondisi ON)

- Mode pengosongan arus induktor (*switching* transistor dalam kondisi OFF)

Pada saat saklar terhubung, induktor akan terisi arus, sementara tegangan $V_L = 0$, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Boost Converter dalam kondisi saklar terhubung

Diperoleh persamaan,

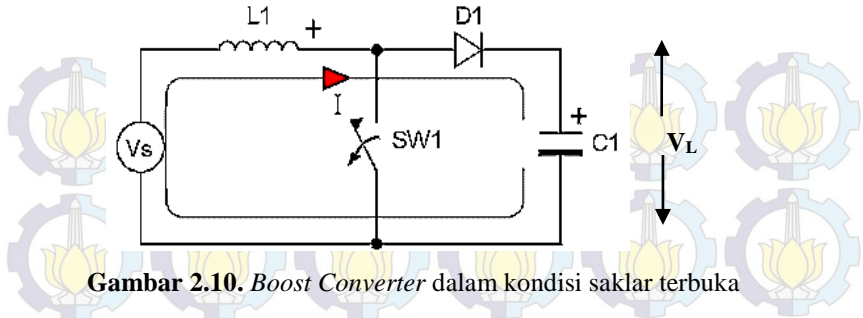
$$V_s = L \frac{dI}{dt} \quad (2.2)$$

Saklar terhubung pada selama t_{on} . Perubahan arus yang melewati induktor diasumsikan konstan, maka pada saat *switching on* menyala (t_{on}) berlaku persamaan sebagai berikut :

$$V_s = L \frac{\Delta I}{dt} \quad (2.3)$$

$$L \Delta I = V_s t_{on} \quad (2.4)$$

Pada saat saklar terbuka, induktor yang semula dalam mode pengisian arus menjadi mode pengosongan arus. Induktor menjadi sumber arus. Beban di suplai oleh dua sumber tegangan yaitu V_s dan V_L . Kondisi inilah yang menyebabkan tegangan *output* selalu lebih besar daripada tegangan *input*. Kondisi pada saat saklar terbuka, ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. *Boost Converter* dalam kondisi saklar terbuka

Saklar terbuka pada saat t_{off} sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$V_S + V_L = V_R \quad (2.5)$$

$$V_S + L \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_R \quad (2.6)$$

Persamaan (2.4) disubsitusikan ke persamaan (2.6) sehingga didapatkan,

$$V_S = V_S \frac{t_{on}}{t_{off}} + V_R \quad (2.7)$$

$$V_R = V_S + \left(1 - \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) \quad (2.8)$$

Duty Cycle (k) adalah rasio antara interval waktu saklar terhubung dengan periode dari sistem.

$$k = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.9)$$

$$t_{on} = k T \quad (2.10)$$

$$t_{off} = (1 - k) T \quad (2.11)$$

Persamaan (2.9) disubsitusikan ke persamaan (2.8) sehingga didapatkan,

$$V_R = V_S \frac{1}{(1-k)} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.12) untuk menghitung tegangan output dari *Boost Converter*. Dalam persamaan tersebut, induktor dan frekuensi switching tidak berpengaruh pada nilai tegangan *output*. Namun, kedua variabel ini

berpengaruh terhadap riak gelombang output. Riak arus dipengaruhi oleh nilai induktansi. Riak tegangan dipengaruhi oleh nilai kapasitansi. Persamaan hubungan antara riak arus dan nilai induktansi dijelaskan pada persamaan (2.13) berikut ini [2].

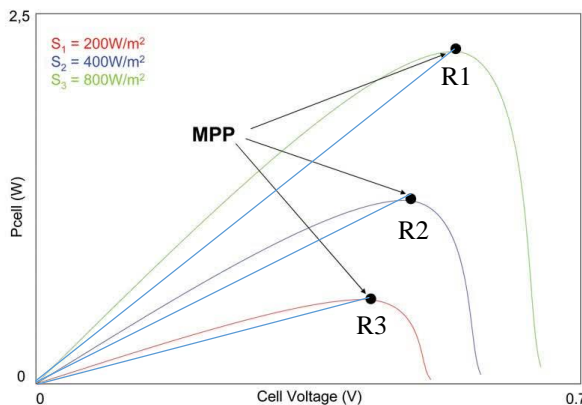
$$V_S = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (2.13)$$

Riak arus ΔI diperoleh dengan menentukan nilai induktansi terlebih dahulu. Perhitungan nilai kapasitansi digunakan persamaan pada saat saklar terbuka seperti pada persamaan (2.14) berikut ini.

$$\Delta V = V_{\max} \frac{t_{off}}{RC} \quad (2.14)$$

2.3 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum power point tracking (MPPT) merupakan suatu metode pada PV system untuk menghasilkan nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum sehingga dihasilkan daya *output* maksimum. MPPT berupa metode penelusuran secara elektronik dengan sebuah algoritma tertentu untuk mencari nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum [7].



Gambar 2.11 Prinsip Kerja MPPT

Pada Gambar 2.11 dijelaskan bahwa daerah operasi maksimal PV terdiri dari 3 daerah tergantung pada garis beban yaitu garis beban R1,

R2, dan R3. Perubahan nilai beban mengakibatkan garis beban berubah. Dalam hal ini secara tidak langsung, MPPT menjadi beban bagi PV system yang berfungsi mengatur garis beban agar PV beroperasi pada daerah maksimal [11].

2.4 Firefly Algorithm (Algoritma Kunang-Kunang)

Firefly algorithm merupakan *meta-heuristic algorithm* yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang. Kunang-kunang memiliki kemampuan untuk mengeluarkan cahaya yang berkedip. Cahaya diproduksi melalui proses *bioluminescence* yang seperti sinyal dalam sistem. Fungsi utama dari kedipan cahaya adalah untuk menarik pasangan dan berkomunikasi. Selain itu, cahaya ini juga berfungsi sebagai mekanisme pertahanan diri. Karakteristik *Firefly Algorithm* mengikuti 3 aturan sebagai berikut [10].

- a. Semua kunang-kunang unisex, artinya semua kunang-kunang saling tertarik satu sama lain tanpa memperdulikan jenis kelamin
- b. Tingkat ketertarikan tergantung pada kecerahan cahaya. Kunang-kunang yang memiliki tingkat kecerahan lebih tinggi akan menarik kunang-kunang yang memiliki tingkat kecerahan lebih rendah. Kecenderungan berbanding terbalik dengan jarak. Semakin dekat semakin cerah, semakin jauh semakin redup. Jika tidak ada satupun kunang-kunang yang lebih cerah, maka semua kunang-kunang bergerak random.
- c. Fungsi kecerahan dari kunang-kunang dipengaruhi oleh fungsi dari sistem yang akan dioptimasi

Firefly algorithm memiliki hal yang paling utama yaitu variasi kecerahan intensitas cahaya dan formulasi dari *attractiveness* (daya tarik). *Attractiveness* dipengaruhi oleh tingkat kecerahan yang berkaitan dengan fungsi dari sistem yang akan dioptimasi. Berikut ini dijelaskan beberapa bagian penting dalam *firefly algorithm* [15].

2.4.1 Attractiveness (Daya Tarik)

Formulasi *attractiveness* dipengaruhi oleh jarak antara dua kunang-kunang seperti dijelaskan pada persamaan berikut ini

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m} \quad m \geq 1 \quad (2.15)$$

r adalah jarak antara dua kunang-kunang β_0 adalah *attractiveness* pada $r = 0$ dan γ adalah koefisien penyerapan cahaya.

2.4.2 Distance (Jarak)

Jarak menentukan tingkat kecerahan cahaya. Jarak antara dua kunang-kunang i dan j adalah X_i dan X_j mempunyai hubungan persamaan berikut ini.

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (X_{i,k} - X_{j,k})^2} \quad (2.16)$$

$X_{i,k}$ adalah komponen dari koordinat X_i dari *firefly* ke i , dan d adalah jumlah dimensi.

2.4.3 Movement (Pergerakan Kunang-Kunang)

Arah pergerakan kunang-kunang selalu mengikuti kunang-kunang yang memiliki tingkat kecerahan lebih tinggi. Kunang-kunang i tertarik pada kunang-kunang j yang dirumuskan dalam persamaan berikut ini.

$$X_i = X_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (X_j - X_i) + \alpha(rand - 0.5) \quad (2.17)$$

rand adalah angka random yang nilainya berkisar antara nilai $[0, 1]$.

Pada implementasinya ditentukan $\beta_0 = 1$ dan $\alpha \in [0, 1]$.

Berdasarkan pada peraturan di atas, langkah dasar *firefly algorithm* yang digunakan untuk proses optimisasi sistem adalah sebagai berikut.

Fungsi objektif $f(X)$, $X = (X_1, \dots, X_d)^T$;

Inisialisasi populasi kunang-kunang X_i ($i = 1, 2, \dots, n$);

Menentukan intensitas cahaya I_i pada X_i dengan $f(X_i)$;

Menentukan koefisien penyerapan cahaya γ

while ($t < \text{Max Generation}$)

 for $i = 1 : n$ (semua n kunang-kunang)

 for $j = 1 : i$ (intensitas cahaya I_i pada X_i ditentukan oleh $f(X_i)$)

 If ($I_j > I_i$)

 Kunang-kunang i berpindah ke f dalam dimensi d

 end if

 Variasi daya Tarik dengan jarak r pada $\exp[-\gamma r]$

 Evaluasi solusi baru dan perbarui intensitas cahaya

 end for j

end for i

Posisi kunang-kuang diurutkan dan mencari posisi terbaik baru

end while

Tampilkan hasil

2.5 MPPT Menggunakan *Firefly Algorithm*

MPPT merupakan metode untuk menentukan daerah operasi maksimum pada PV. Nilai tegangan dan nilai arus dibandingkan kemudian dioptimisasi supaya diperoleh daya maksimum pada kondisi beban tertentu. *Firefly algorithm* berfungsi untuk menentukan daerah operasi maksimal PV pada berbagai variasi intensitas cahaya matahari.

Nilai beban yang berubah-ubah juga menyebabkan nilai *Maximum Power Point* juga berubah. Perubahan ini menyebabkan, pergeseran letak garis beban. Garis beban inilah yang menjadi acuan untuk menentukan daerah operasi maksimal sehingga menghasilkan daya keluran yang maksimal juga. Pencarian daerah operasi maksimal ini, dilakukan oleh *firefly algorithm*. Pergeseran garis beban akan mempengaruhi perubahan letak daerah operasi maksimal, sehingga dapat dikatakan bahwa secara tidak langsung *boost converter* berfungsi sebagai beban [11].

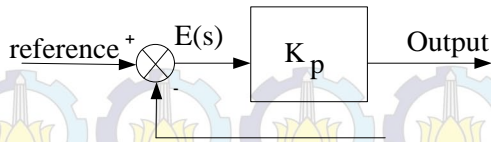
2.6 Kontroler PID

Pada sistem yang berjalan, *error* dapat terjadi. Terjadinya eror ini akan mempengaruhi kinerja sistem. Penambahan kontroler perlu dilakukan untuk membuat sistem kembali stabil. Kontroler berfungsi untuk mereduksi eror antara sinyal *setting* dan sinyal aktual. Sistem yang efektif akan mampu bereaksi dengan cepat dengan sinyal aktual yang dihasilkan [1].

2.6.1 Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional memiliki keluaran berupa hasil kali antara gain proporsional dengan sinyal input. Keluaran kontrol proporsional Sinyal input yang berubah akan mempengaruhi perubahan konstanta pengali. langsung mengubah keluaran sebesar konstanta pengali.

Gambar 2.12 menunjukkan blok diagram pada kontroler proporsional. Sinyal *error* merupakan selisih antara sinyal setting dengan sinyal aktual.



Gambar 2.12 Blok diagram sinyal kontroler proporsional

Kontroler proporsional mempunyai konstanta K_p . Penggunaan konstanta K_p ini mengikuti ketentuan sebagai berikut.

1. Jika nilai K_p kecil maka kontroler proporsional melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan mengakibatkan respon sistem yang lambat.
2. Kalau nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan stabil.
3. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi.

2.6.2 Kontroler Integral

Kontroler integral mempunyai fungsi untuk menghasilkan kesalahan bernilai nol pada keadaan *steady state*. Keluaran kontroler integral sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Berikut ini adalah karakteristik dari kontroler integral.

1. Kontroler integral memperlambat respon karena membutuhkan waktu tertentu untuk menghasilkan keluaran
2. Ketika sinyal *error* berharga nol, maka keluaran akan tetap pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal *error* tidak berharga nol, maka nilai keluaran tergantung nilai besarnya sinyal *error* dan nilai K_i .
4. K_i (konstanta integral) yang berakibat meningkatnya sinyal osilasi dan mempercepat hilangnya *offset*.

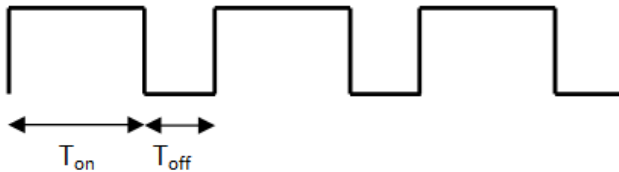
2.6.3 Kontroler Diferensial

Pada umumnya kontroler diferensial berfungsi untuk mempercepat respon awal suatu sistem, namun tidak memperkecil nilai *error* [9]. Kontroler diferensial tidak pernah digunakan pada lingkup yang sempit karena hanya berkerja efektif pada sistem yang kecil. Kontroler diferensial memiliki faktor konstanta differensial T_d . Berikut adalah karakteristik kontroler diferensial.

1. Kontroler diferensial tidak bisa menghasilkan keluaran jika tidak ada perubahan sinyal *error*
2. Jika sinyal *error* berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.

2.7 Pulse Wave Modulation (PWM)

PWM merupakan metode untuk mengatur lebar pulsa yang digunakan pada sistem kontrol pada *boost converter*. *PWM* bekerja dengan bantuan gelombang kotak yang dapat diubah-ubah siklus kerjanya (*Duty Cycle*) untuk menghasilkan tegangan yang bervariasi [6].



Gambar 2.13 Modulasi sinyal PWM pada *boost converter*

Pada Gambar 2.13 dapat dijelaskan bahwa T_{on} merupakan waktu di mana tegangan keluaran bernilai tinggi dan T_{off} merupakan waktu di mana tegangan keluaran rendah. Sedangkan T adalah periode gelombang yang merupakan penjumlahan antara T_{on} dan T_{off} . Siklus kerja (*Duty Cycle*) diperoleh dari :

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.18)$$

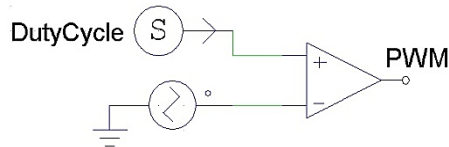
Tegangan yang keluar dapat bervariasi sehingga didapatkan,

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (2.19)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T} \times V_{in} \quad (2.20)$$

Sehingga nilai tegangan *output* didapatkan dengan mengubah nilai T_{on} . Untuk mendapatkan sinyal PMW dari sinyal input berupa sinyal analog

dapat dilakukan dengan membentuk gelombang gigi gergaji atau sinyal segitiga yang diteruskan ke *comparator* bersama sinyal aslinya.



Gambar 2.14 Membangkitkan sinyal PWM dengan sinyal gigi gergaji

Pada Gambar 2.14 dijelaskan bahwa gelombang gigi gergaji atau sinyal segitiga dimasukkan ke komparator dengan input berupa *duty cycle* untuk menghasilkan sinyal PWM [8].

2.8 Mobil Surya (Solar Car)

Mobil surya (*solar car*) menggunakan sumber daya *PV system* sebagai penggerakannya. Spesifikasi *phovoltaic* yang digunakan pada simulasi ini sesuai dengan spesifikasi PV pada Mobil Suryawangsa. Mobil ini merupakan karya dari SMK Muhammadiyah 7 Malang dan Laboratorium PSOC Teknik Elektro ITS.



Gambar 2.15 Mobil Listrk Suryawangsa

Mobil ini memiliki roda penggerak motor DC dengan kecepatan laju antara 30-70 km/jam. Simulasi ini menggunakan spesifikasi PV yang sesuai pada Mobil Suryawangsa yaitu daya maksimal 100 Watt, Berikut ini adalah tabel spesifikasi *PV* untuk Mobil Suryawangsa [4].

Tabel 3.1 Spesifikasi PV Untuk Mobil Suryawangsa

Parameter	Nilai
Rating PV	100 Watt (2 buah PV @ 50 Watt)
Jenis PV	Policrystalline
Rating Bateri	24 Volt (4 buah Bateri, @ 6Volt)
Jenis Bateri	Lead Acid (<i>deep cycle</i>)

BAB 3

PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA

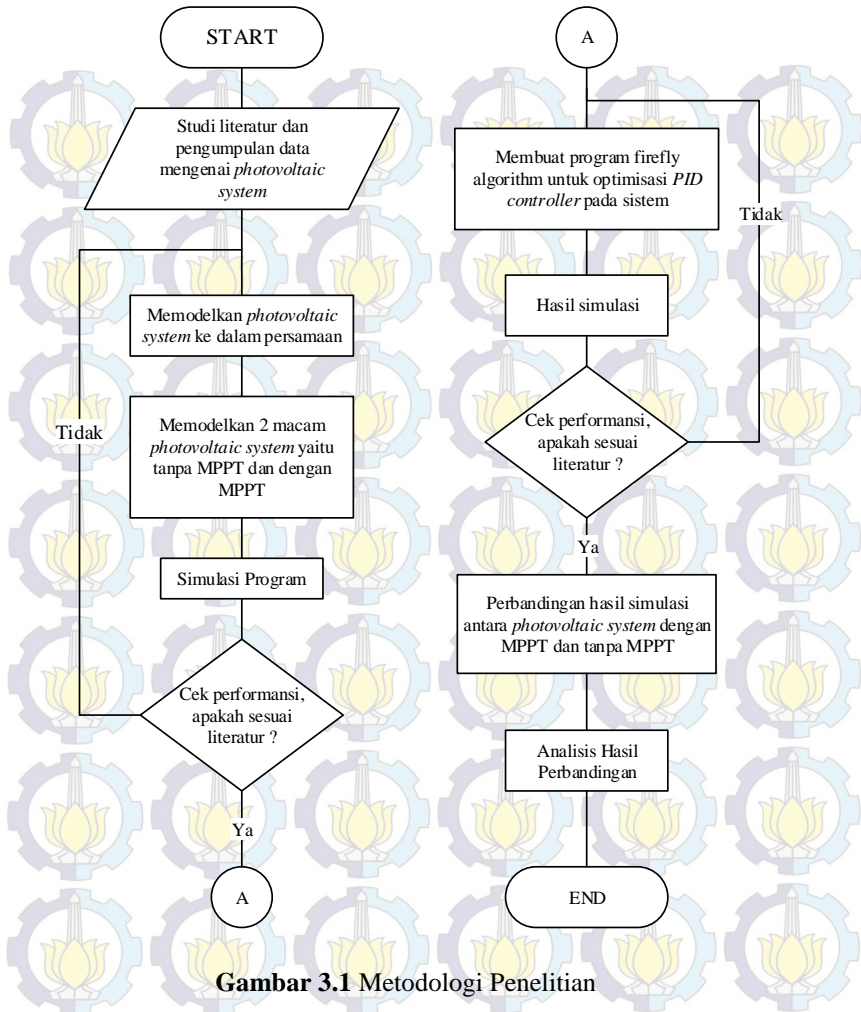
3.1 Metodologi Penelitian

Pada Tugas Akhir ini, digunakan *firefly algorithm* untuk mengoptimisasi *Maximum Power Point Tracking* pada PV system. Simulasi penelitian ini bertujuan untuk mengoptimisasi parameter-parameter MPPT pada berbagai kondisi intensitas cahaya matahari agar didapatkan daya keluaran yang maksimal sesuai dengan *set point* yang sudah ditentukan. Pada Gambar 3.1 dijelaskan bahwa penelitian ini dimulai dengan studi literature dari berbagai sumber baik buku maupun penelitian yang lain. Selanjutnya, pengumpulan data-data yang terkait dengan PV system. Data-data yang diperoleh digunakan untuk membuat permodelan PV system.

Berikutnya, mendesain *photovoltaic system*, *boost converter*, kontroler PID, dan PWM. Desain sistem dibuat dengan software PSIM yang dihubungkan dengan Matlab Simulink. PSIM dan Simulink dihubungkan dengan *SIM Coupler*. Simulink digunakan untuk menjalankan *Firefly Algorithm*. Sistem dibuat dengan dua jenis yaitu menggunakan PID controller dengan *firefly algorithm* dan tanpa menggunakan *PID controller* dengan *firefly algorithm*.

PID controller didesain di Matlab Simulink. *Firefly Algorithm* berfungsi untuk menala parameter PID agar mendapatkan nilai yang terbaik. Nilai PID yang terbaik akan menyebabkan nilai *duty cycle* yang tepat sesuai dengan kondisi intensitas cahaya matahari [12].

Intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah akan menyebabkan daya keluaran yang berubah-ubah. Kontroler PID berkerja berdasarkan hasil penalaan dari *firefly algorithm* untuk kemudian mengatur *duty cycle* agar didapatkan daya keluaran yang maksimal. Simulasi ini bertujuan untuk memperoleh perbandingan antara daya keluaran *photovoltaic system* tanpa optimisasi *firefly algorithm* dan dengan optimisasi *firefly algorithm* pada intensitas cahaya matahari yang berbeda-beda.

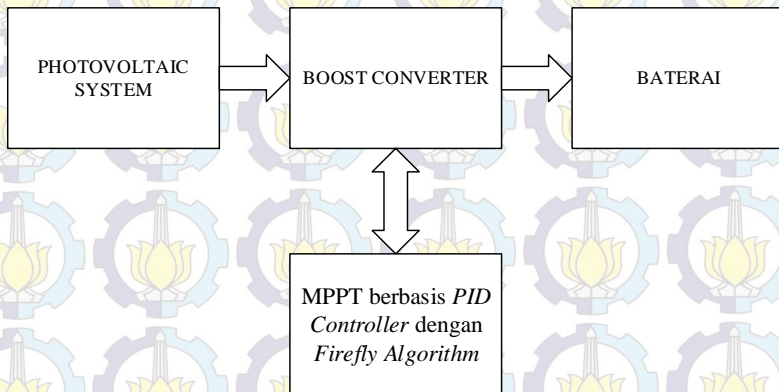


Gambar 3.1 Metodologi Penelitian

3.2 Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan

Pada bagian ini dijelaskan mengenai permodelan sistem dari setiap bagian. Selain itu juga dibahas mengenai aplikasi *firefly algorithm* untuk optimisasi *Maximum Power Point Tracking* pada *photovoltaic system*. .

Secara umum desain *Maximum Power Point Tracking* menggunakan *firefly algorithm* dijelaskan pada Gambar 3.3. Spesifikasi tegangan keluaran dan daya PV system mengacu pada spesifikasi tegangan baterai yang digunakan pada Mobil Suryawangsa.



Gambar 3.2 MPPT berbasis PID dengan *Firefly Algorithm*

3.2.1 Pemodelan *Photovoltaic*

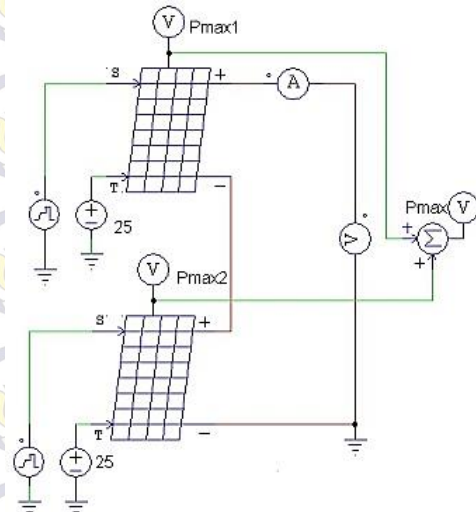
Photovoltaic system pada simulasi ini terdiri atas 2 buah modul *solar cell* dengan kapasitas masing-masing 50 W yang dipasang secara seri sehingga daya maksimal yang dihasilkan adalah 100 W. Spesifikasi *photovoltaic* yang digunakan pada simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi modul PV

Parameter	Nilai
Daya Maksimum (P_{max})	50 Watt
Tegangan Maksimum (V_{mp})	17,35 Volt
Arus Maksimum (I_{mp})	2,88 Ampere
Tegangan <i>Open circuit</i> (V_{oc})	21,88 Volt
Arus <i>Short circuit</i> (I_{sc})	3,08 Ampere
Koefisien Temperatur dari V_{oc}	-0,38% °Celsius
Koefisien Temperatur dari I_{sc}	0,04% °Celsius
Temperatur saat bekerja	-40 °C hingga 85 °C
Jumlah Cell	24 cell

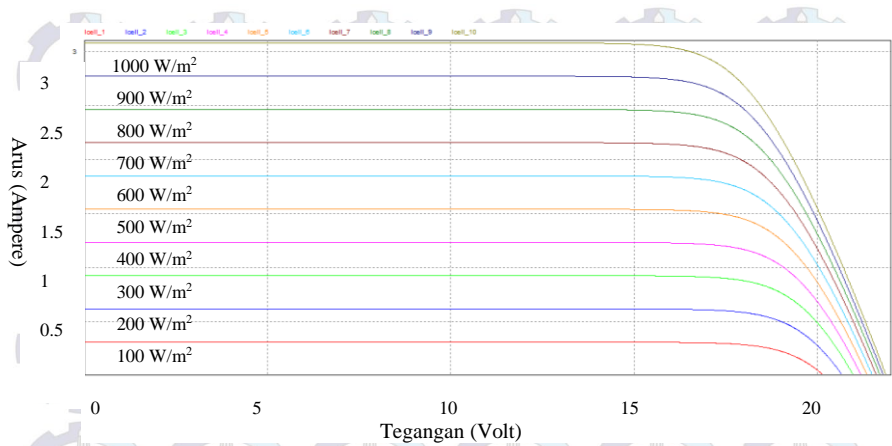
Nilai dari spesifikasi *photovoltaic* pada didapatkan dari penelitian sebelumnya[4].

Pemodelan *photovoltaic* terdiri dari 2 buah modul seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut ini.

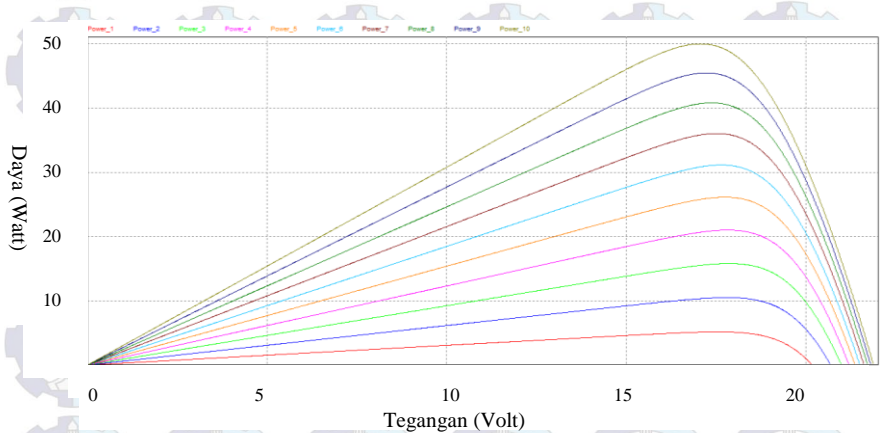


Gambar 3.3 Pemodelan *photovoltaic*

PV dimodelkan untuk mendapatkan nilai daya maksimal pada setiap *irradiance*. Nilai daya digunakan sebagai nilai referensi pada MPPT. Selain nilai daya, juga diperoleh nilai tegangan yang digunakan sebagai tegangan referensi dari *boost converter*. Kurva karakteristik *photovoltaic* pada *irradiance* 100 W/m² sampai 1000 W/m² dan temperature 25°C ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5 berikut ini.



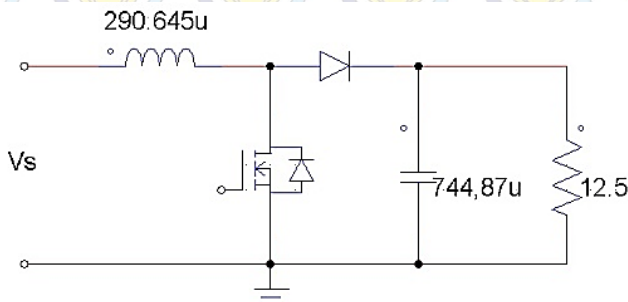
Gambar 3.4 Kurva V-I pada berbagai nilai *irradiance* dari 100 W/m² sampai 1000 W/m²



Gambar 3.5 Kurva P-V pada berbagai nilai *irradiance* dari 100 W/m² sampai 1000 W/m²

3.2.2 Pemodelan *Boost Converter*

Photovoltaic system pada simulasi ini menggunakan *boost converter* yang digunakan untuk menaikkan tegangan. Komponen utama terdiri atas MOSFET, induktor, resistor, dan kapasitor. Gambar 3.5 merupakan permodelan *boost converter*.



Gambar 3.6 Permodelan *Boost Converter*

Pada Gambar 3.6 dijelaskan bahwa pada *boost converter* terdapat nilai parameter dari arus induktor, arus kapsitor, *duty cycle* dan nilai resistor beban.

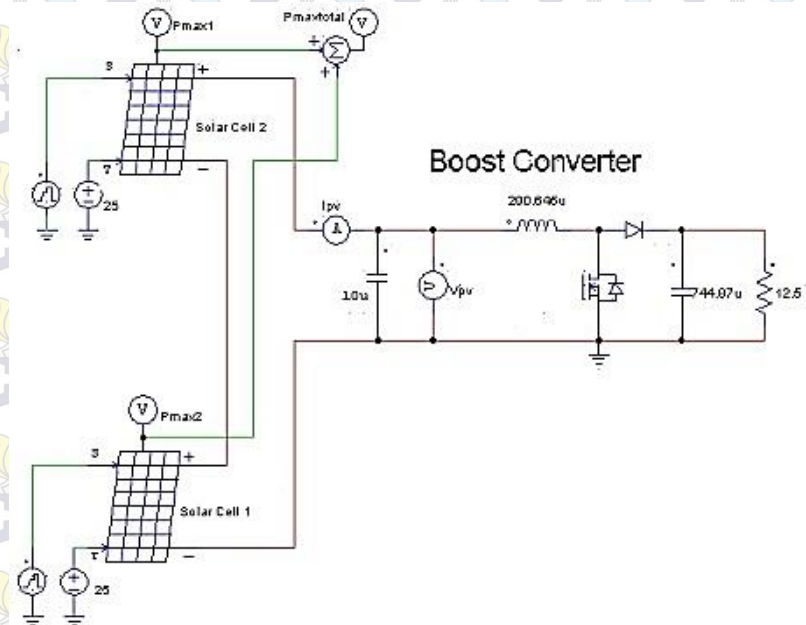
Tabel 3.2 Spesifikasi *boost converter*

Parameter	Nilai
Power maksimal PV	100 Watt
V_{in}	8-21 Volt
V_{out}	28 Volt
Frekuensi switching	35 kHz
Duty cycle	0,71429
Arus ripple maksimal	10%
Induktor konverter <i>boost</i>	290.645 μH
Kapasitor konverter <i>boost</i>	744,87 μF
Resistor beban	12,5 Ω

Semua nilai dari parameter-parameter *boost converter* di atas didapatkan dari penelitian sebelumnya [4].

3.2.3 Pemodelan *Photovoltaic System*

Pemodelan sistem menggunakan pada Tugas Akhir ini dirancang menggunakan PSIM. Gambar 3.7 berikut menunjukkan konfigurasi sistem yang terdiri dari *solar module*, *boost converter*, dan beban.



Gambar 3.7 *Photovoltaic System* menggunakan *boost converter*

Pada sistem di atas terdapat parameter-parameter yang menunjukkan masing-masing bagian dari *photovoltaic system*. Dimulai dari bagian input sistem berupa tegangan dan arus. Nilai intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah dan suhu yang konstan merupakan parameter input yang menyebabkan *photovoltaic system* menghasilkan daya keluaran [13].

Tegangan dan arus input dioptimisasi untuk menghasilkan daya maksimum dari pada *photovoltaic*. Optimisasi tegangan dan arus dilakukan oleh kontroler PID yang nilai K_p , K_i , dan K_d dihitung dengan

metode *firefly algorithm*. Hasil dari optimisasi berupa *duty cycle* yang berfungsi untuk mengatur kerja dari *boost converter*. *Boost converter* digunakan untuk mengatur nilai tegangan agar menghasilkan daya yang sesuai.

Dalam optimisasi, nilai tegangan dan daya dibandingkan untuk memperoleh perubahan arus yang bias diamati dan berfungsi sebagai sinyal feedback untuk menghasilkan keluaran daya yang maksimal sehingga *photovoltaic* dapat bekerja pada daerah maksimal.

3.2.4 Pulse Wave Modulation Untuk Boost Converter

Pulse Wave Modulation (PWM) merupakan suatu metode untuk mengatur lebar pulsa yang digunakan untuk mengatur kerja dari *boost converter*. Sinyal *duty cycle* dihubungkan ke Simulink dengan *SIM Coupler* untuk mendapatkan sinyal dari Simulink. Sinyal dari Simulink digabungkan dengan sinyal gigi gergaji (*triangle wave*) melalui komparator. PWM bekerja menghasilkan *duty cycle* yang diatur oleh *firefly algorithm* [14].

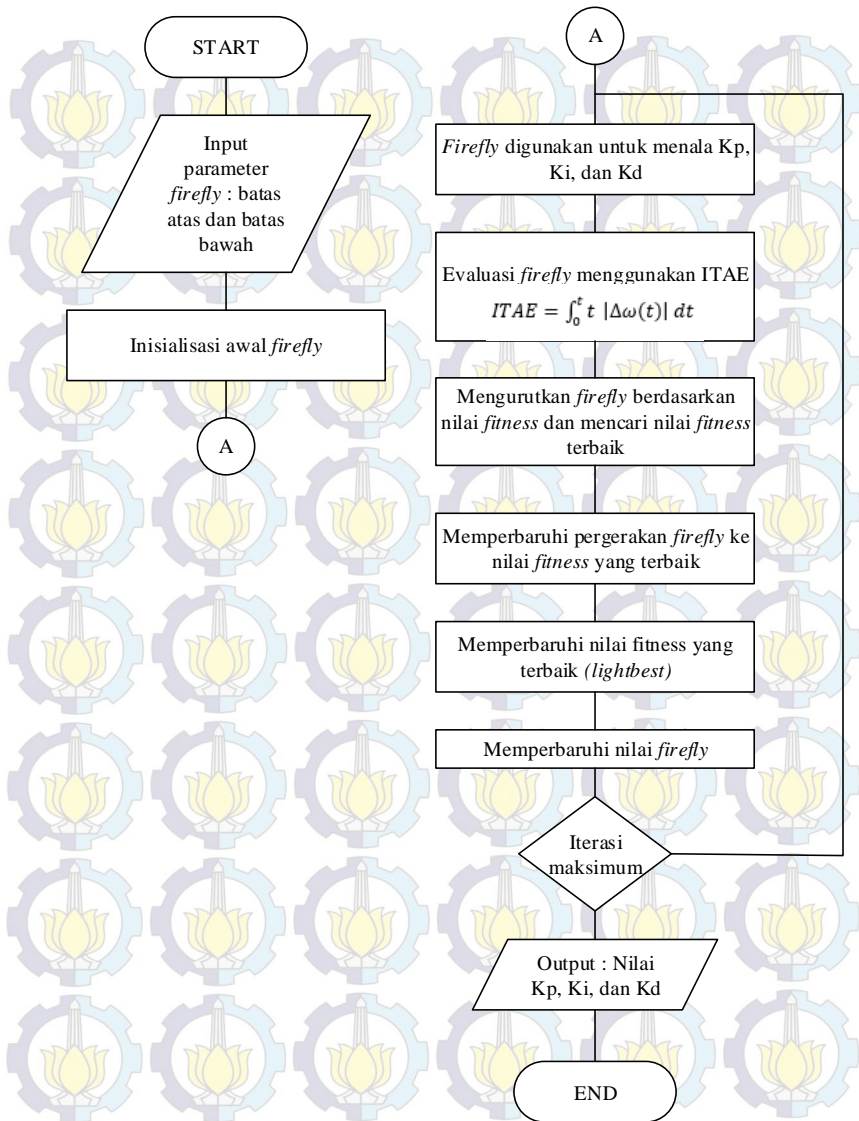
Proses penalaan oleh *firefly algorithm* terjadi di Simulink untuk menghasilkan nilai parameter K_p , K_i , K_d . *PID Controller* bekerja sesuai dengan parameter K_p , K_i , dan K_d yang dihasilkan dengan metode penalaan *firefly algorithm*. Nilai parameter dari *PID controller* ini mengatur nilai dari *duty cycle*. Nilai dari *duty cycle* antara 0,5-0,8. Nilai *duty cycle* mempengaruhi kerja dari *boost converter*. *Boost converter* inilah yang menghasilkan nilai tegangan yang bervariasi, sehingga didapatkan daya yang maksimal pada *photovoltaic system* [9].

3.3 Metode Firefly Algorithm

Metode yang digunakan untuk optimisasi *Maximum Power Point Tracking* ini adalah *firefly algorithm*. Metode ini digunakan untuk menala parameter PID yang digunakan untuk memperoleh daya maksimal pada *photovoltaic system*. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah dengan menggunakan *Integral Time Absolute Error* (ITAE).

$$ITAE = \int_0^t t |\Delta\omega(t)| dt \quad (3.1)$$

Parameter yang ditala oleh *firefly algorithm* adalah K_p , K_i , dan K_d . Diagram alur proses penalaan parameter oleh *firefly algorithm* ditunjukkan oleh *flowchart* pada Gambar 3.8.

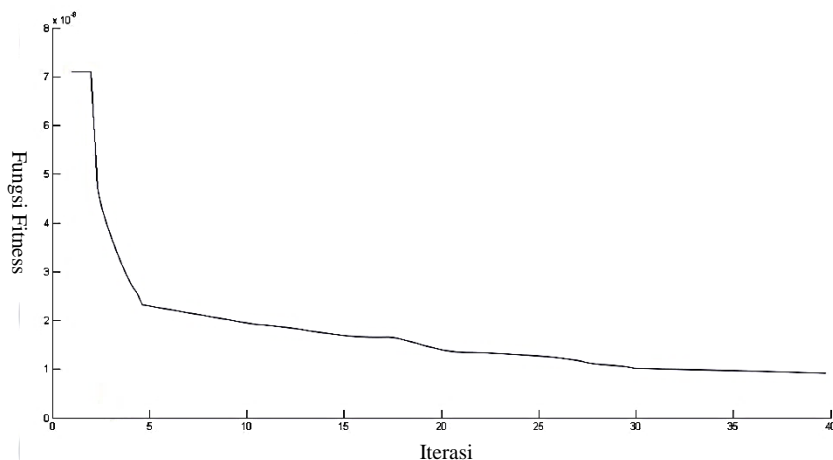


Gambar 3.8 Diagram alur metode *firefly algorithm*

Tabel 3.3 Parameter *Firefly Algorithm*

Parameter FA	Nilai
<i>Alpha</i>	0,25
<i>Beta</i>	0,2
<i>Gamma</i>	1
<i>Dimensi</i>	3
<i>Jumlah Kunang-Kunang</i>	50
<i>Iterasi Maksimum</i>	40

Sistem disimulasikan pada berbagai nilai beban untuk mengetahui pengaruh metode *firefly algorithm* pada daya keluaran yang dihasilkan. Beban yang dipakai adalah resistor 12,5 Ω , 15 Ω , 17,5 Ω , dan 20 Ω . Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 12,5 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.9.



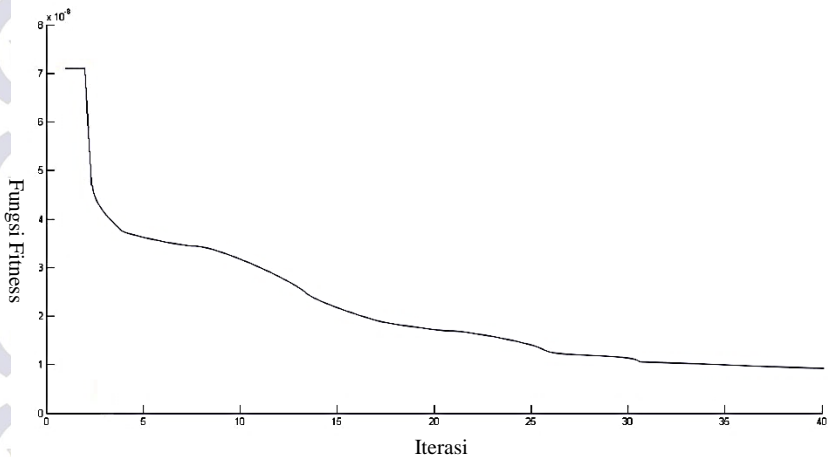
Gambar 3.9 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 12.5 Ω

Pada Gambar 3.10 dapat ditunjukkan bahwa *firefly algorithm* konvergen pada iterasi ke 33 dan didapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter *PID Controller* pada beban 12,5 Ω

Parameter	Nilai
K_p	2,75
K_i	1,0
K_d	0,01

Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 15 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.10.



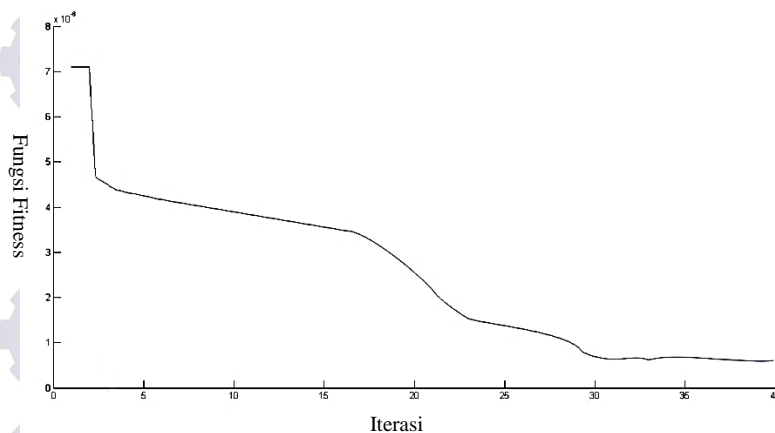
Gambar 3.10 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 15 Ω

Pada Gambar 3.11 dapat dijelaskan bahwa *firefly algorithm* konvergen pada iterasi ke 34 dan didapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Parameter *PID Controller* pada beban 15 Ω

Parameter	Nilai
Kp	2.95
Ki	1,02
Kd	0.05

Untuk grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 17,5 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.11.



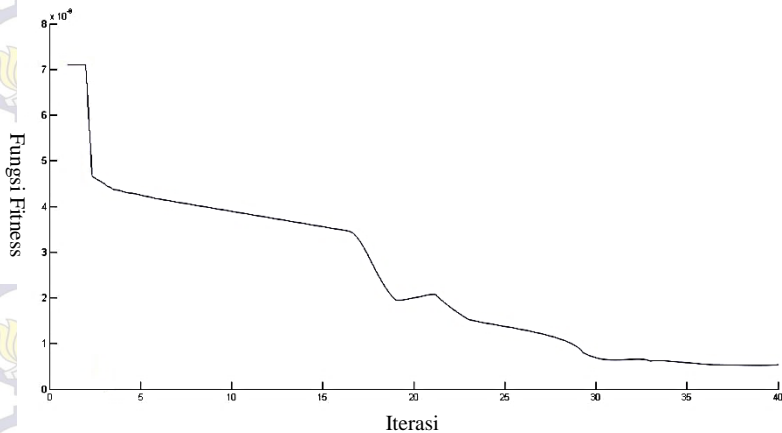
Gambar 3.11 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 17,5 Ω

Pada Gambar 3.11 dapat dijelaskan bahwa *firefly algorithm* mengalami konvergensi pada iterasi ke 33 dan didapatkan nilai parameter Kp, Ki, dan Kd seperti yang ditunjukkan Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Parameter *PID Controller* pada beban 17.5 Ω

Parameter	Nilai
Kp	3.01
Ki	1,01
Kd	0.03

Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 20 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 20 Ω

Pada Gambar 3.12 dijelaskan bahwa *firefly algorithm* mengalami konvergensi pada 31 dan didapatkan nilai parameter Kp, Ki, dan Kd seperti yang ditunjukkan Tabel 3.5.

Tabel 3.7 Parameter *PID Controller* pada beban 20 Ω

Parameter	Nilai
Kp	2.91
Ki	1,02
Kd	0.02

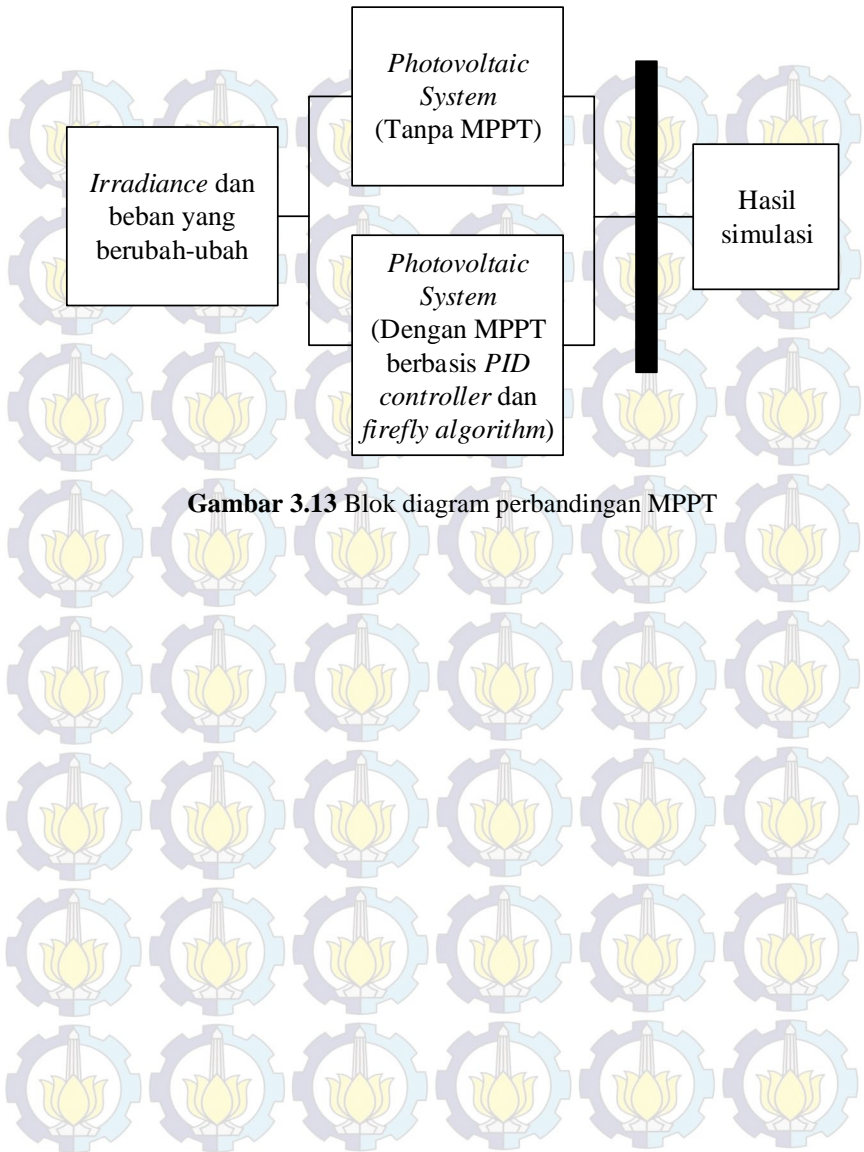
Nilai K_p , K_i , dan K_d merupakan nilai hasil perhitungan menggunakan *firefly algorithm* yang digunakan untuk optimisasi *boost converter*. Bagian *boost converter* yang dioptimisasi adalah nilai *duty cycle*.

3.4 Simulasi Sistem

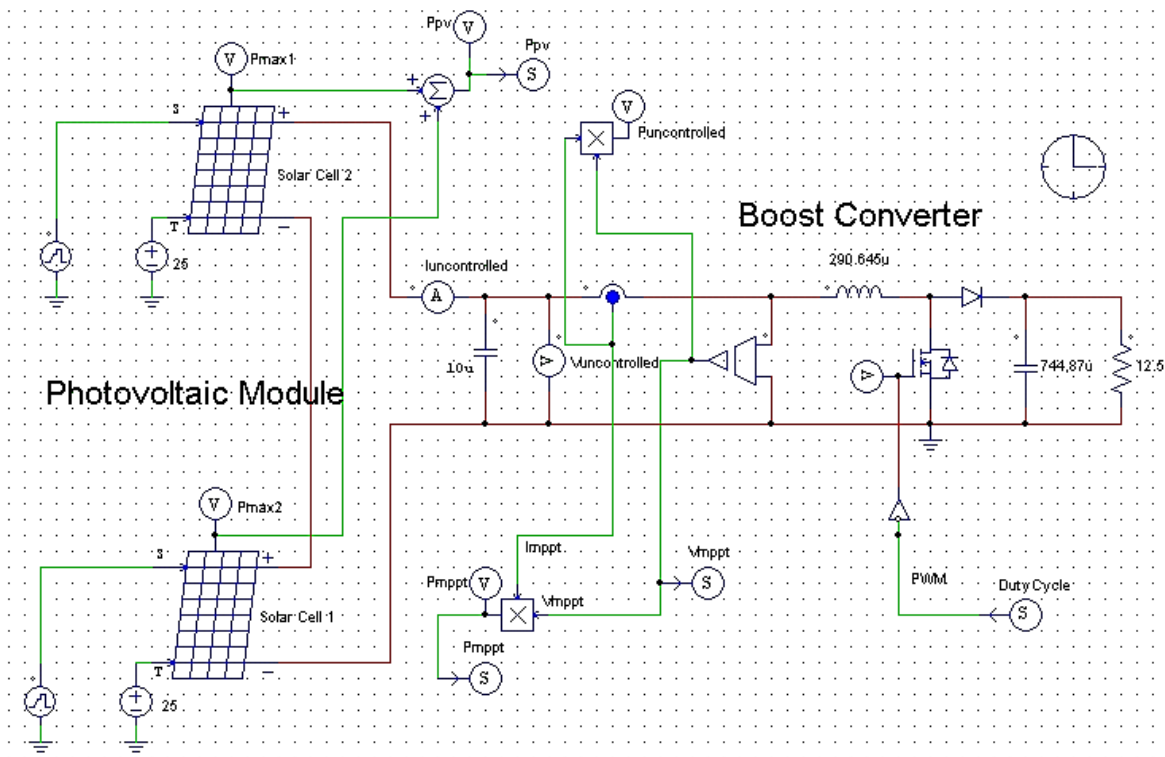
Simulasi bertujuan untuk membandingkan hasil antara *Maximum Power Point Tracking* menggunakan parameter *PID controller* dengan *firefly algorithm* dan *Maximum Power Point Tracking* menggunakan kontroler pada kondisi intensitas cahaya matahari yang berbeda-beda. Perbandingan ini untuk menunjukkan penggunaan sistem control untuk mengatur agar *photovoltaic system* bekerja pada daerah maksimal sehingga menghasilkan daya yang maksimal [16].

Pada simulasi yang dijalankan tanpa sistem kontrol ini, nilai dari *duty cycle* berubah-ubah tanpa dikontrol dan perubahannya tidak teratur karena nilai intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah juga. Nilai *duty cycle* yang dihasilkan tidak dikontrol sehingga nilainya tidak optimal dan *photovoltaic system* tidak bekerja pada daerah maksimal. Sedangkan dengan tambahan *PID controller*, tegangan dan arus dari *photovoltaic* masuk ke *PID controller* dan dioptimisasi untuk menghasilkan daya keluaran yang mendekati daya keluaran *photovoltaic* yang maksimal.

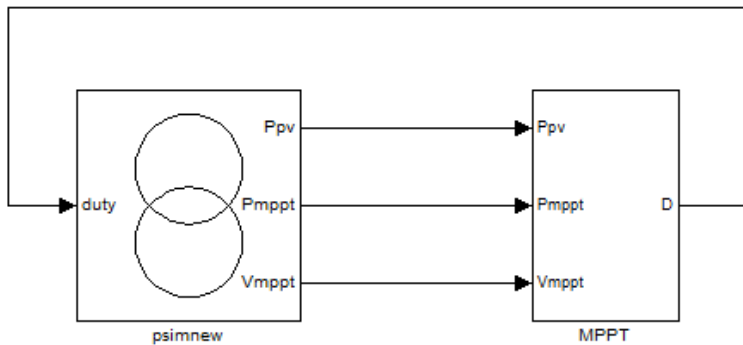
Nilai intensitas cahaya matahari (*irradiance*) yang berubah-ubah ini menyebabkan daya maksimal *photovoltaic* yang dihasilkan juga berubah-ubah dengan nilai dibawah daya maksimal (*set point*). Dalam hal ini, *firefly algorithm* berfungsi melakukan penalaan untuk menemukan nilai parameter yang optimal dari *PID controller*. Parameter *PID controller* yang optimal diperoleh jika nilai daya keluaran dapat mendekati nilai daya maksimal (*set point*) pada berbagai nilai intensitas cahaya matahari. Gambar 3.13 menunjukkan perbandingan MPPT berbasis *PID controller* dengan *firefly algorithm* dan



Gambar 3.13 Blok diagram perbandingan MPPT

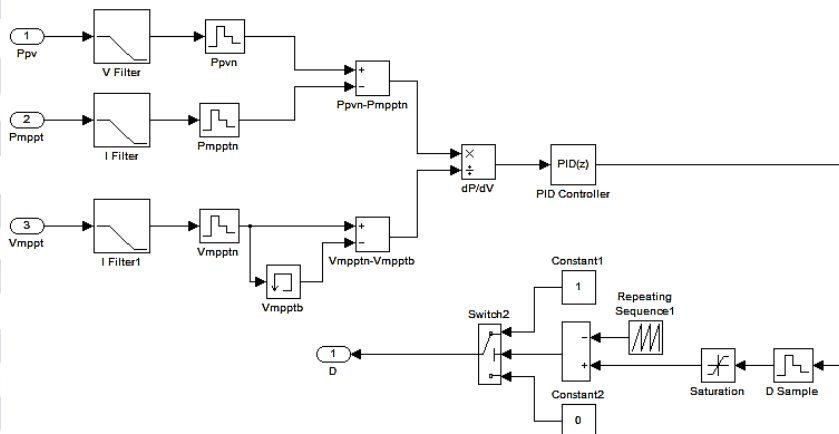


Gambar 3.14 Pemodelan MPPT berbasis *PID controller* dengan *firefly algorithm*



Gambar 3.15 Diagram blok MPPT pada Matlab Simulink

Blok diagram *PID controller* dimodelkan di software Matlab Simulink yang ditunjukkan pada Gambar 3.16 berikut ini.



Gambar 3.16 Pemodelan *PID controller*

Gambar 3.14 menunjukkan tentang pemodelan sistem yang terdiri dari *photovoltaic module*, *boost converter*, dan MPPT yang terhubung dengan *SIM Coupler*. PV modul terdiri dari dua buah yang masing-masing

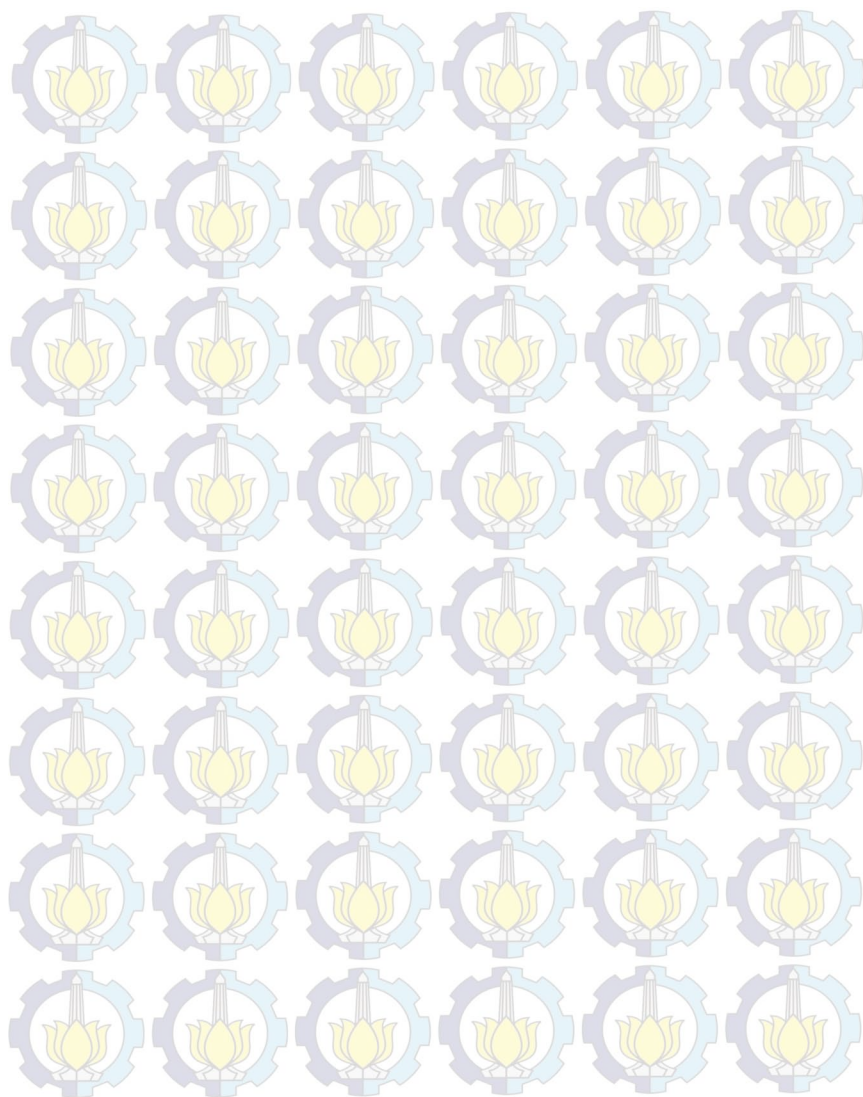
memiliki daya 50 Watt dipasang seri sehingga dapat menghasilkan daya keluaran maksimal hingga 100 Watt. Tegangan dan arus yang keluar masuk ke *boost converter*. *Boost converter* berfungsi untuk menaikkan tegangan berdasarkan pada *duty cycle*.

Tegangan dan arus yang masuk akan dioptimisasi oleh *PID controller* yang nilai parameternya dihitung dan dioptimisasi menggunakan *firefly algorithm*. Hasil optimisasi oleh *firefly algorithm* ini menghasilkan nilai K_p , K_i , dan K_d yang digunakan untuk mengatur kinerja *Pulse Wave Modulation*. PWM digunakan untuk menghasilkan sinyal *duty cycle* yang digunakan untuk mengatur kinerja *boost converter*.

Tegangan dan arus dari *photovoltaic module* masuk ke *boost converter* kemudian masuk ke blok MPPT kemudian dioptimisasi nilai tegangannya untuk menghasilkan nilai *duty cycle*. Nilai tegangan dan arus dikalikan menghasilkan nilai daya. Nilai daya yang dihasilkan dibandingkan dengan nilai daya maksimal (*set point*). Jika nilai eror masih besar, maka proses diulangi sampai secara terus menerus sampai menghasilkan nilai *error* terkecil. Nilai *error* semakin kecil artinya, *photovoltaic* dapat bekerja pada daerah maksimal. Optimisasi dilakukan pada nilai tegangan yang diubah-ubah dengan mengubah-ubah nilai *duty cycle*.

Nilai *duty cycle* mempengaruhi nilai tegangan keluaran. Perubahan nilai tegangan menyebabkan perubahan nilai daya keluaran. Dalam hal ini *duty cycle* berfungsi untuk mengatur nilai tegangan sehingga *photovoltaic* dapat menghasilkan daya keluaran yang maksimal. Kinerja sistem secara keseluruhan diatur oleh *PID controller* yang nilai parameter K_p , K_i , dan K_d dioptimisasi dengan metode *firefly algorithm*.

Nilai daya sebelum masuk ke *boost converter* dibandingkan dengan nilai daya setelah masuk pada *boost converter* untuk mengetahui pengaruh *firefly algorithm* dalam proses optimisasi sistem pada berbagai kondisi intensitas cahaya matahari. Untuk pembahasan hasil simulasi *photovoltaic system* dan juga optimisasi parameter K_p , K_i , dan K_d , terdapat pada bab 4.



BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

PV yang digunakan pada simulasi ini adalah *photovoltaic system* yang menggunakan *boost converter*. Metode optimisasi yang digunakan adalah *firefly algorithm*. PV dikontrol oleh *PID controller*. *Firefly algorithm* digunakan untuk menala parameter K_p , K_i , dan K_d . Daya maksimal *photovoltaic* ditentukan sebagai daya referensi (*set point*). *PID controller* digunakan untuk mengatur *duty cycle* pada *boost converter*. *PID controller* bekerja berdasarkan pada nilai hasil penalaan dari *firefly algorithm*. Analisis dilakukan untuk mengetahui perbandingan pengaruh *firefly algorithm* pada daya keluaran yang dihasilkan pada berbagai kondisi intensitas cahaya matahari. Simulasi Tugas Akhir ini dijalankan pada software PSIM dan Matlab Simulink yang diintegrasikan dengan *SIM Coupler*. Program dijalankan pada *Notebook* dengan spesifikasi sebagai berikut.

Processor	:Intel® Core™ i5-2450M @2.50 GHz
Memory	:4 GB RAM
Operating System	:Windows 8.1 Pro
Software	:Matlab Simulink 2010a dan PSIM 9

PV disimulasikan pada berbagai kondisi dan intensitas cahaya matahari dengan suhu konstan 25°C dan *irradiance* yang berubah-ubah. Berikut ini adalah data kondisi pengujian PV.

Tabel 4.1 Data karakteristik daya PV

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	Daya Maksimal PV (Watt)
100	10,3
200	21,1
300	31,8
400	42,1
500	52,2
600	62,2
700	72,2
800	81,7
900	90,8
1000	99,9

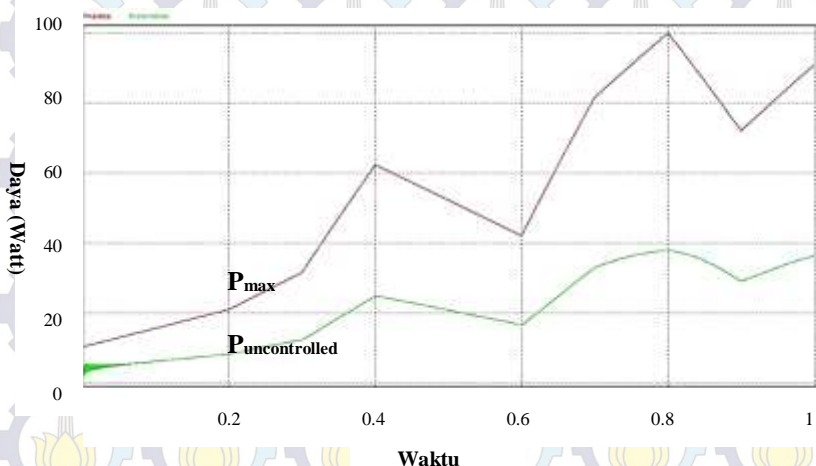
Beban yang digunakan pada PV adalah beban resistor yang berbeda-beda yaitu $12,5 \Omega$, 15Ω , $17,5 \Omega$, dan 20Ω . Nilai beban yang diubah-ubah bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan beban pada nilai daya keluaran pada PV yang menggunakan MPPT. Data yang akan dianalisis pada simulasi ini adalah nilai daya *photovoltaic system* tanpa MPPT dan *photovoltaic system* menggunakan MPPT untuk mengetahui pengaruh dari penalaan dengan metode *firefly algorithm* terhadap kerja *boost converter*.

4.1 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban $12,5 \Omega$

Pada bagian ini PV bekerja pada beban $12,5 \Omega$. Untuk mengetahui daya keluaran yang dihasilkan, simulasi dilakukan pada kondisi suhu konstan 25°C dengan *irradiance* yang berubah-ubah. PV dibandingkan pada saat kondisi tanpa menggunakan MPPT dan dengan menggunakan MPPT. Hasil simulasi dan perbandingan dijelaskan pada bagian sub-bab di bawah ini.

4.1.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Simulasi dijalankan tanpa menggunakan MPPT yang terpasang pada PV. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban $12,5 \Omega$

Gambar 4.1 menunjukkan daya keluaran dari PV yang tidak dilengkapi dengan MPPT. Dari grafik tersebut didapatkan nilai daya dan *error* daya sebagai berikut.

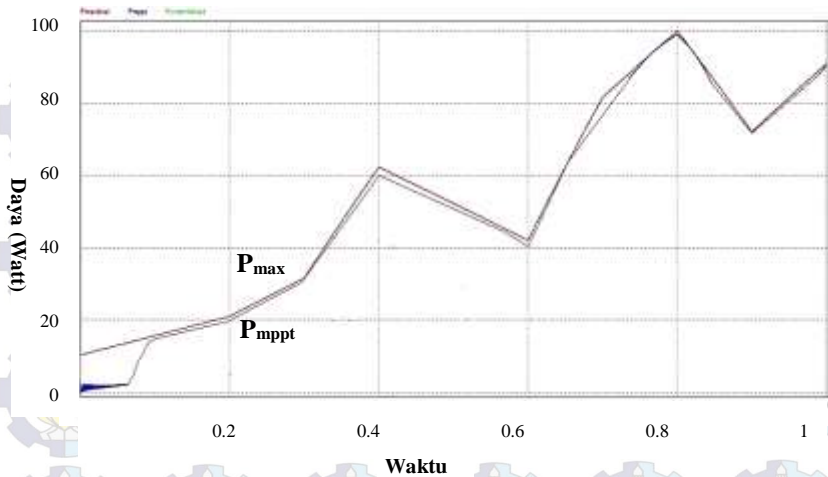
Tabel 4.2 Data *error* daya PV tanpa MPPT pada beban 12,5 Ω

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	$P_{uncontrolled}$ (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{uncontrolled}$)
100	9,8	10,3	0,5
200	11,1	20,9	9,8
300	13,7	31,8	18,1
600	29,7	62,2	32,5
500	22,1	52,2	30,1
400	18,2	42,1	23,9
800	36,2	81,7	45,5
1000	38,9	99,9	61
700	31,9	72,2	40,3
900	37,2	90,8	53,6

Pada Tabel 4.2 menunjukkan selisih perbedaan antara daya maksimal dan daya tanpa menggunakan MPPT. Dari data dapat dijelaskan bahwa terdapat perbedaan selisih yang cukup besar dikarenakan daya keluaran *photovoltaic* tidak dikontrol sehingga *photovoltaic* tidak dapat bekerja pada daerah maksimal.

4.1.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Simulasi berikutnya adalah simulasi perbandingan antara daya menggunakan MPPT untuk mengetahui pengaruhnya terhadap daya keluaran pada beban 12.5 Ω .



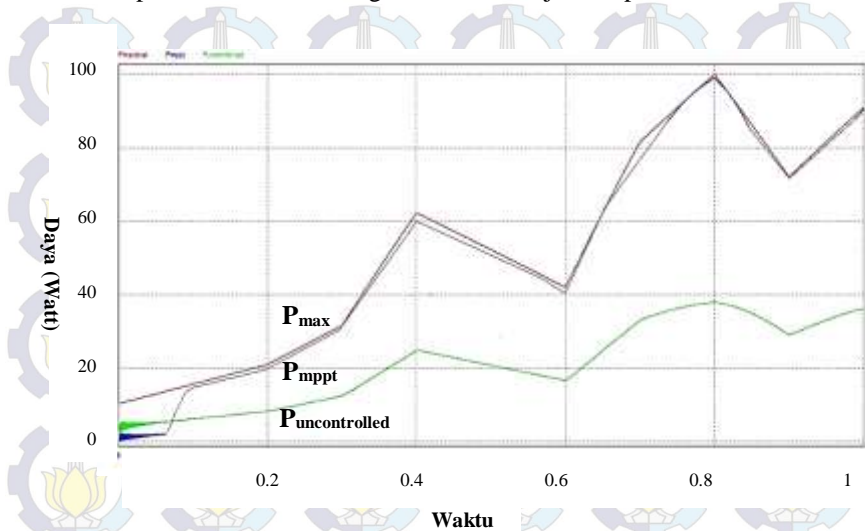
Gambar 4.2 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban $12,5 \Omega$

Data *error* daya antara PV dengan MPPT ditunjukkan pada Tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban $12,5 \Omega$

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{mppt}$)
100	9,3	10,3	1
200	18,2	20,9	2,7
300	30,2	31,8	1,6
600	61,1	62,2	1,1
500	50,2	52,2	2
400	40,9	42,1	1,2
800	80,1	81,7	1,6
1000	98,2	99,9	1,7
700	70,9	72,2	1,3
900	89,1	90,8	1,7

Hasil simulasi untuk mengetahui perbandingan daya keluaran pada PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 12,5 Ω

Dari Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa daya keluaran PV dengan menggunakan MPPT, nilainya dapat mengikuti daya maksimal sehingga dapat dijelaskan bahwa *photovoltaic* dapat bekerja pada daerah maksimal. Error daya yang didapatkan pada *irradiance* 300 Watt/m² adalah 1,6 Watt dan 1,7 Watt pada *irradiance* 900 Watt/m². Grafik perbandingan error daya PV yang tanpa menggunakan MPPT dan menggunakan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut ini.



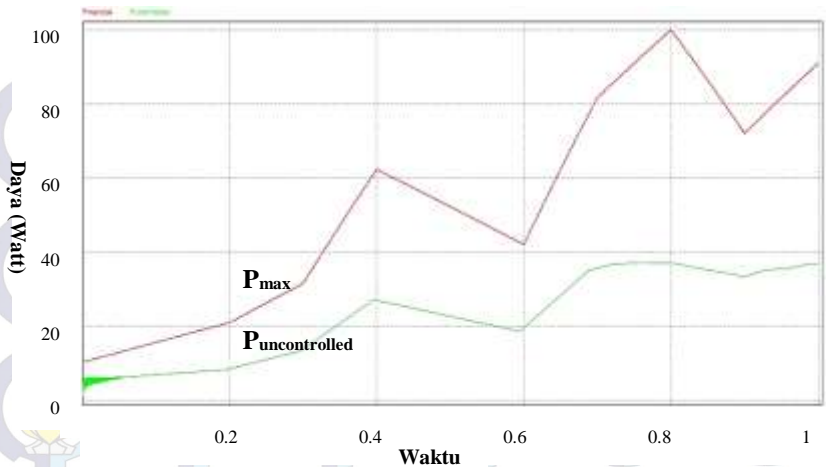
Gambar 4.4 Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban $12,5 \Omega$

4.2 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 15Ω

Pada bagian ini PV bekerja pada beban 15Ω . Untuk mengetahui daya keluaran yang dihasilkan, simulasi dilakukan pada kondisi suhu konstan 25°C dengan *irradiance* yang berubah-ubah. PV dibandingkan pada saat kondisi tanpa menggunakan MPPT dan dengan menggunakan MPPT. Hasil simulasi dan perbandingan dijelaskan pada bagian di bawah ini.

4.2.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Simulasi dijalankan tanpa menggunakan MPPT yang terpasang pada PV. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik perbandingan $P_{\text{uncontrolled}}$ dan P_{\max} pada beban 15Ω

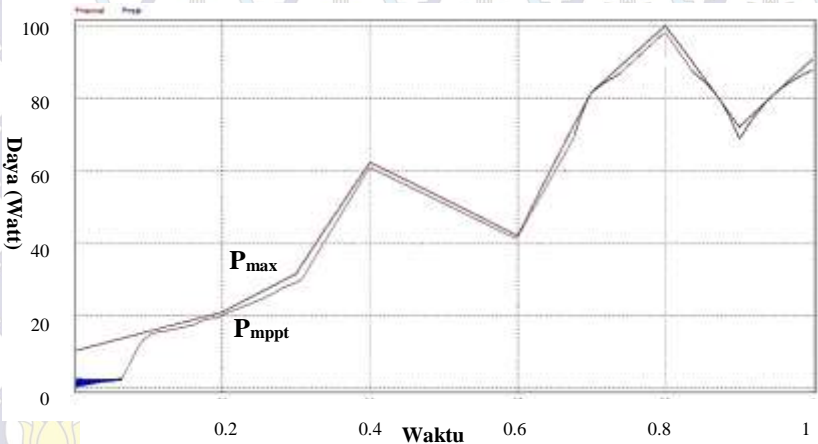
Dari Gambar 4.5 dapat dijelaskan bahwa daya keluaran PV tanpa MPPT tidak dapat mengikuti nilai daya keluaran maksimal. Data *error* daya PV tanpa MPPT ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Data *error* daya PV tanpa MPPT pada beban 15Ω

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	$P_{\text{uncontrolled}}$ (Watt)	P_{\max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{\max} - P_{\text{uncontrolled}}$)
100	9,7	10,3	0,60
200	10,9	20,9	10,00
300	12,5	31,8	19,30
600	29,6	62,2	32,60
500	21,6	52,2	30,60
400	17,9	42,1	24,20
800	35,3	81,7	46,40
1000	37,4	99,9	62,50
700	30,3	72,2	41,90
900	36,7	90,8	54,10

4.2.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Hasil simulasi PV yang menggunakan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.6 di bawah ini.



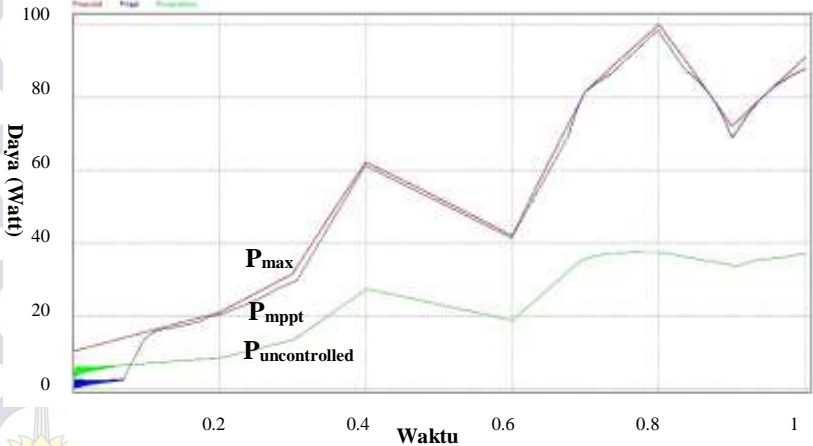
Gambar 4.6 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban $15\ \Omega$

Pada Gambar 4.6 dapat dijelaskan pada saat beban ditambah daya keluaran menjadi berkurang.

Tabel 4.5 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban $15\ \Omega$

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{mppt}$)
100	9,2	10,3	1,10
200	18,3	20,9	2,60
300	29,4	31,8	2,40
600	60,9	62,2	1,30
500	49,1	52,2	3,10
400	39,6	42,1	2,50
800	80,1	81,7	1,60
1000	98,3	99,9	1,60
700	70,3	72,2	1,90
900	89,2	90,8	1,60

Hasil simulasi untuk perbandingan antara PV dengan MPPT dan PV dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut ini.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 15Ω

Pada Gambar 4.7 dapat dijelaskan bahwa terjadi perubahan daya keluaran PV dengan MPPT dan PV tanpa MPPT dengan kondisi beban yang bertambah dari $12,5 \Omega$ menjadi 15Ω . Penambahan beban menyebabkan perubahan nilai *error* daya. Grafik perbandingan *error* daya antara PV dengan MPPT dan PV tanpa MPPT dapat ditunjukkan pada Gambar 4.8.



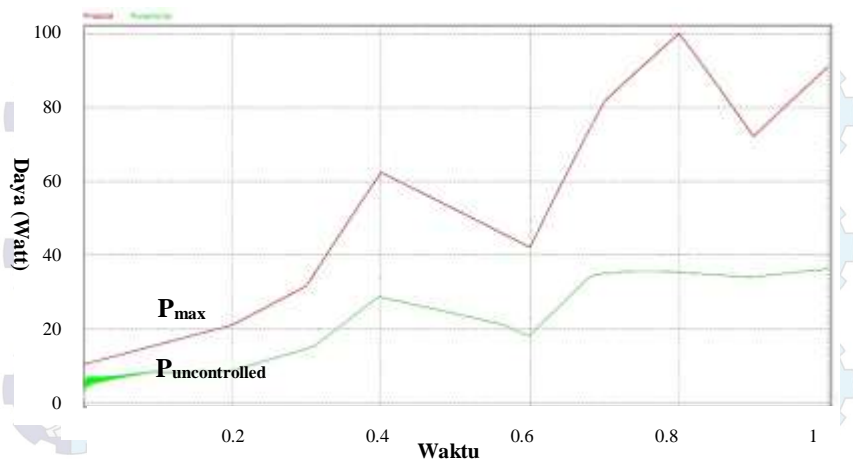
Gambar 4.8. Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 15Ω

4.3 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Saat Beban 17.5Ω

Simulasi selanjutnya dijalankan dengan menaikkan beban menjadi 17.5Ω untuk mengetahui pengaruh kenaikan beban pada daya keluaran. Hasil simulasi dan perbandingan antara PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT dijelaskan pada sub-bab berikut ini.

4.3.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Beban yang digunakan nilainya dinaikkan menjadi 17.5Ω dengan tujuan untuk mengetahui nilai perubahan daya keluaran. Hasil simulasi PV tanpa MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan $P_{\text{uncontrolled}}$ dan P_{max} pada beban 17.5Ω

Pada Gambar 4.9 dapat dijelaskan bahwa daya keluaran PV tanpa MPPT tidak dapat menyesuaikan dengan nilai daya keluaran maksimal. Data error daya PV ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut ini.

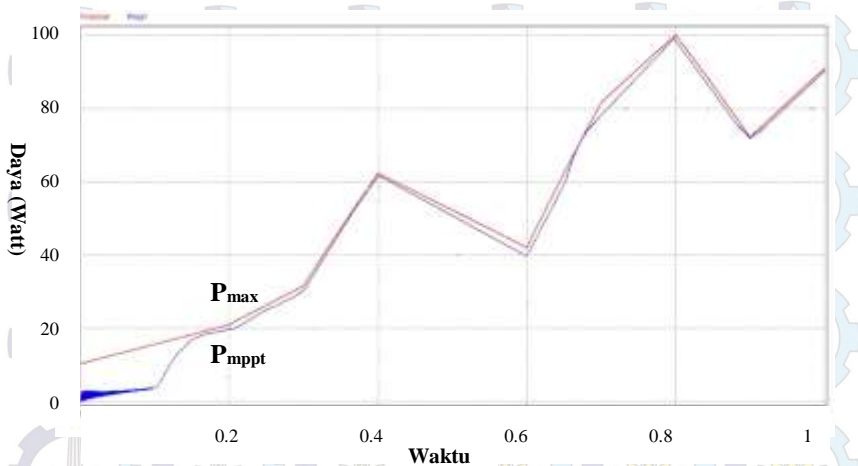
Tabel 4.6 Data error daya PV tanpa MPPT pada beban $17,5 \Omega$

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	$P_{\text{uncontrolled}}$ (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{\text{max}} - P_{\text{uncontrolled}}$)
100	9,5	10,3	0,8
200	10,5	20,9	10,4
300	11,3	31,8	20,5
600	29,5	62,2	32,7
500	20,5	52,2	31,7
400	16,2	42,1	25,9
800	34,9	81,7	46,8
1000	36,3	99,9	63,6
700	29,5	72,2	42,7
900	35,7	90,8	55,1

Pada Tabel 4.6 dapat dijelaskan bahwa dengan bertambahnya beban, PV mengalami penurunan nilai *error* daya.

4.3.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Hasil simulasi PV dengan menggunakan MPPT yang dilakukan pada beban $17,5 \Omega$ ditunjukkan pada Gambar 4.10 berikut ini.



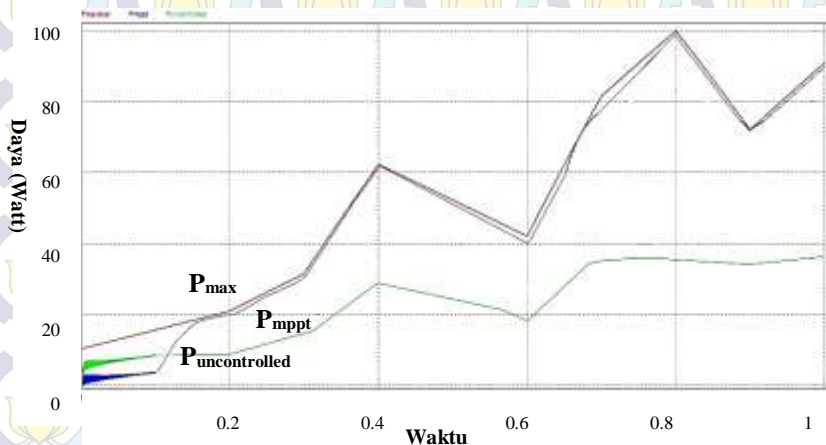
Gambar 4.10 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban $17,5 \Omega$

Pada Gambar 4.10 dapat dijelaskan bahwa daya pada *irradiance* 1000 W/m^2 mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya nilai beban. Data *error* daya PV dengan menggunakan MPPT ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban 17,5 Ω

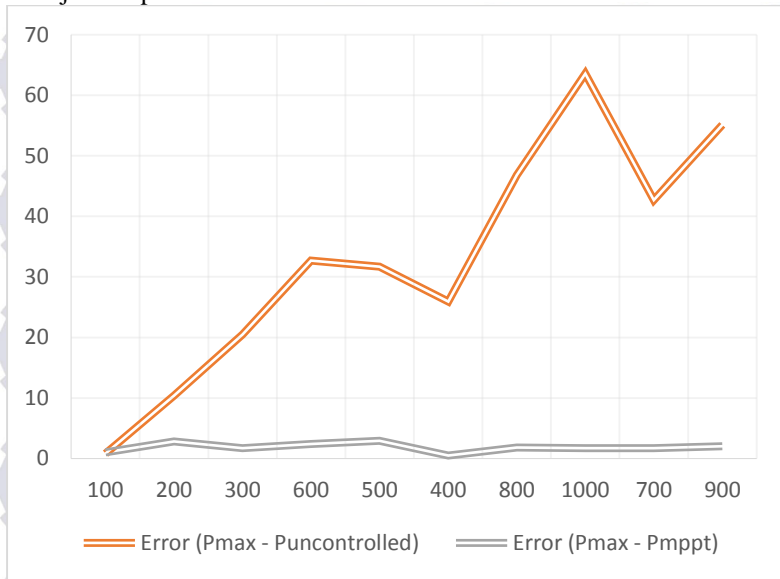
<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{mppt}$)
100	9,3	10,3	1
200	18,1	20,9	2,8
300	30,1	31,8	1,7
600	59,8	62,2	2,4
500	49,3	52,2	2,9
400	41,6	42,1	0,5
800	79,9	81,7	1,8
1000	98,2	99,9	1,7
700	70,5	72,2	1,7
900	88,8	90,8	2

Pada Tabel 4.7 dapat dijelaskan bahwa *error* daya PV dengan menggunakan MPPT mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya beban. Hasil simulasi perbandingan antara PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut ini.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 17.5 Ω

Data perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.12.



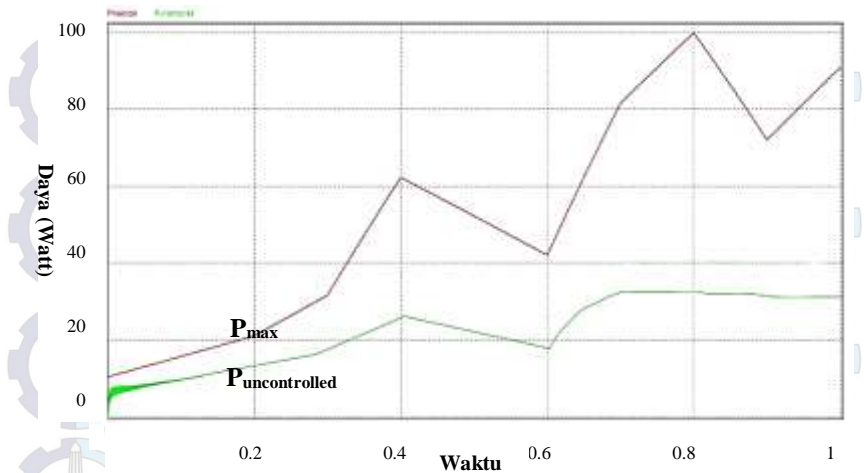
Gambar 4.12 Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 17,5 Ω

4.4 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Saat Beban 20 Ω

Pada simulasi selanjutnya, beban dinaikkan menjadi 20 Ω untuk mengetahui nilai daya keluaran baik tanpa MPPT maupun dengan MPPT. Penjelasan mengenai hasil simulasi dijelaskan pada bagian sub-bab berikut ini.

4.4.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Hasil simulasi PV tanpa MPPT pada beban 20 Ω ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik perbandingan $P_{\text{uncontrolled}}$ dan P_{\max} pada beban 20Ω

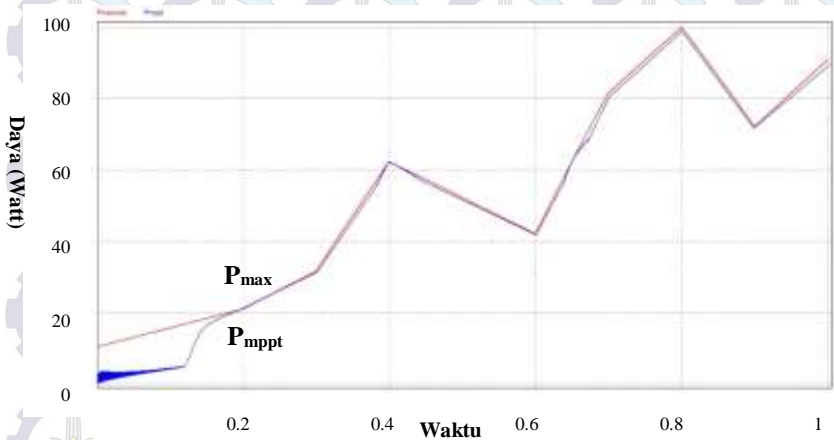
Data *error* daya ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut ini. Terdapat *error* yang cukup besar.

Tabel 4.8 Data *error* daya PV tanpa MPPT pada beban 20Ω

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	$P_{\text{uncontrolled}}$ (Watt)	P_{\max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{\max} - P_{\text{uncontrolled}}$)
100	9,4	10,3	0,90
200	10,3	20,9	10,60
300	11,1	31,8	20,70
600	28,3	62,2	33,90
500	19,2	52,2	33,00
400	16,1	42,1	26,00
800	33,8	81,7	47,90
1000	35,1	99,9	64,80
700	28,9	72,2	43,30
900	34,3	90,8	56,50

4.4.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Hasil simulasi PV dengan MPPT pada beban $20\ \Omega$ ditunjukkan pada Gambar 4.14 berikut ini.



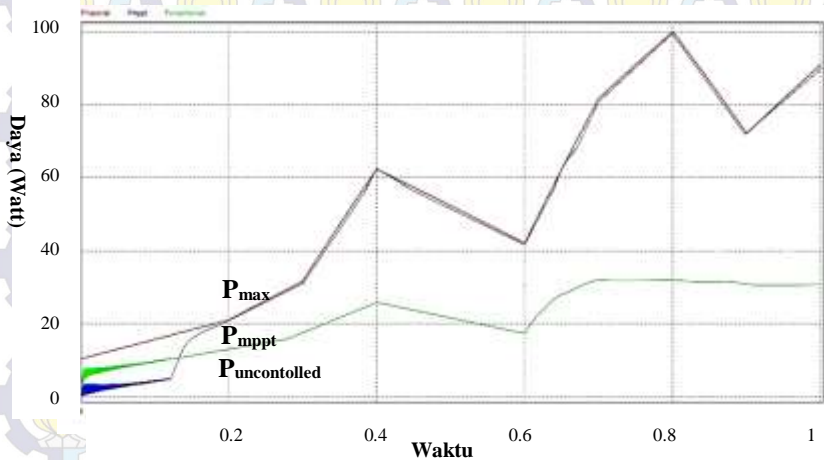
Gambar 4.14 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban $20\ \Omega$

Data *error* daya PV ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut ini. Nilai *error* yang didapatkan antara 0,10 Watt – 2,6 Watt.

Tabel 4.9 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban $20\ \Omega$

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{mppt}$)
100	9,5	10,3	0,80
200	19,9	20,9	1,00
300	29,2	31,8	2,60
600	62,1	62,2	0,10
500	50,2	52,2	2,00
400	41,9	42,1	0,20
800	80,9	81,7	0,80
1000	99,5	99,9	0,40
700	71,7	72,2	0,50
900	89,1	90,8	1,70

Pada Tabel 4.9 dapat dijelaskan bahwa daya keluaran nilainya semakin berkurang jika dibandingkan dengan PV pada beban 17.5Ω . Hasil perbandingan antara daya keluaran PV dengan MPPT dan PV tanpa MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut ini.



Gambar 4.15 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 20Ω

Pada Tabel 4.9 dapat dijelaskan bahwa daya PV dengan MPPT cenderung dapat mengikuti nilai daya maksimal dari PV. Pada *irradiance* 300 Watt/m^2 didapatkan *error* daya sebesar 2,6 Watt dan pada *irradiance* 900 Watt/m^2 didapatkan *error* daya sebesar 1,7 Watt. Nilai daya tertinggi didapatkan ketika *irradiance* sebesar 1000 Watt/m^2 . Data perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 20 Ω

4.5 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Semua Nilai Beban

PV disimulasikan dengan berbagai macam nilai beban yang berubah ubah dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh nilai beban terhadap nilai daya keluaran. Beban yang digunakan yaitu 12.5 Ω , 15 Ω , 17.5 Ω , dan 20 Ω . Perbandingan nilai daya keluaran PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut ini.

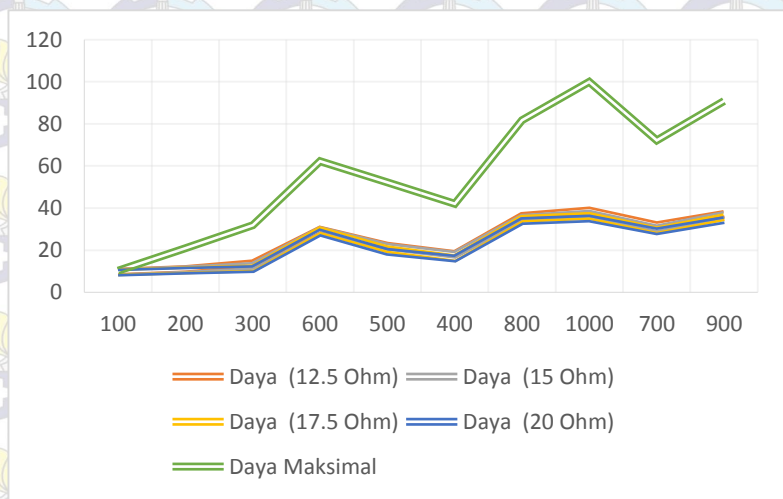
4.5.1 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Tanpa MPPT Pada Semua Nilai Beban

Daya keluaran PV tanpa MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut ini.

Tabel 4.10 Perbandingan daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

Irradiance (Watt/m²)	Daya (12,5 Ω)	Daya (15 Ω)	Daya (17,5 Ω)	Daya (20 Ω)	Daya Maksimal
100	9,8	9,7	9,5	9,4	10,3
200	11,1	10,9	10,5	10,3	20,9
300	13,7	12,5	11,3	11,1	31,8
600	29,7	29,6	29,5	28,3	62,2
500	22,1	21,6	20,5	19,2	52,2
400	18,2	17,9	16,2	16,1	42,1
800	36,2	35,3	34,9	33,8	81,7
1000	38,9	37,4	36,3	35,1	99,9
700	31,9	30,3	29,5	28,9	72,2
900	37,2	36,7	35,7	34,3	90,8

Grafik perbandingan nilai daya keluaran PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Gambar 4.17 berikut ini.



Gambar 4.17 Grafik perbandingan nilai daya tanpa MPPT pada semua nilai beban

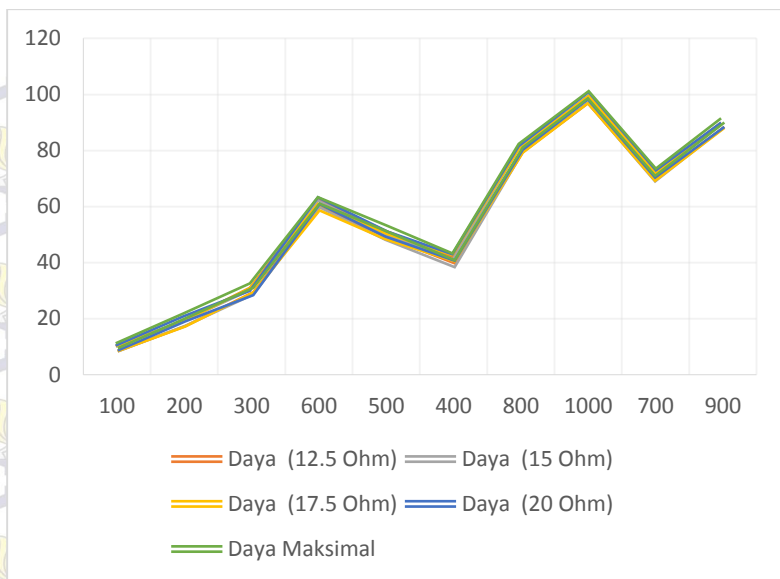
4.5.2 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Dengan MPPT Pada Semua Nilai Beban

Daya keluaran PV tanpa MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.11 berikut ini.

Tabel 4.11 Perbandingan daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	Daya (12,5 Ω)	Daya (15 Ω)	Daya (17,5 Ω)	Daya (20 Ω)	Daya Maksimal
100	9,3	9,2	9,3	9,5	10,3
200	18,2	18,3	18,1	19,9	20,9
300	30,2	29,4	30,1	29,2	31,8
600	61,1	60,9	59,8	62,1	62,2
500	50,2	49,1	49,3	50,2	52,2
400	40,9	39,6	41,6	41,9	42,1
800	80,1	80,1	79,9	80,9	81,7
1000	98,2	98,3	98,2	99,5	99,9
700	70,9	70,3	70,5	71,7	72,2
900	89,1	89,2	88,8	89,1	90,8

Pada Tabel 4.11 dapat dijelaskan bahwa nilai daya keluaran mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya nilai beban. Pertambahan nilai beban juga mempengaruhi nilai daya keluaran PV dengan MPPT. Pertambahan beban ini juga akan mengubah nilai titik kerja maksimal (*Maximum Power Point*) dari PV. Nilai daya keluaran paling maksimal didapatkan ketika nilai *irradiance* paling maksimal juga yaitu 1000 Watt/m². Grafik perbandingan nilai daya keluaran PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Gambar 4.18 berikut ini.



Gambar 4.18 Grafik perbandingan nilai daya dengan MPPT pada semua nilai beban

4.6 Analisis dan Perbandingan *Error* Daya PV Pada Semua Nilai Beban

Analisis dan perbandingan *error* daya PV digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh MPPT dalam meningkatkan nilai *error* daya.

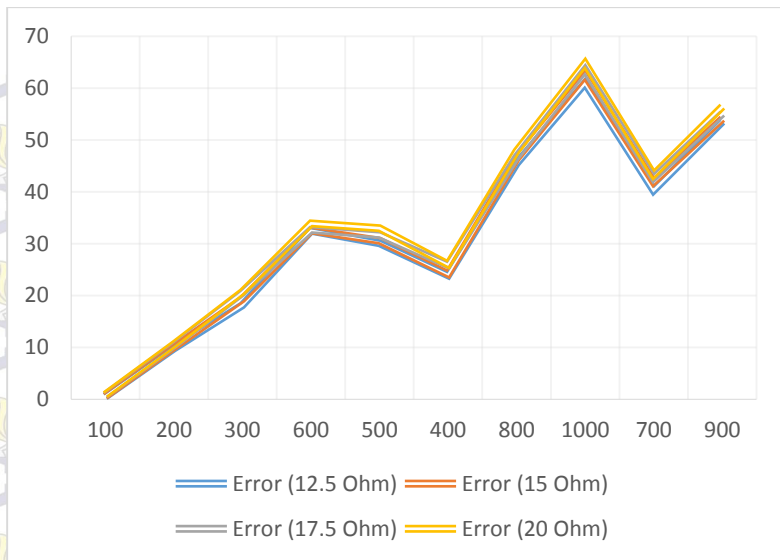
4.6.1 Analisis dan Perbandingan *Error* daya PV Tanpa MPPT Pada Semua Nilai Beban

Error daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.12 berikut ini.

Tabel 4.12 Data nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	<i>Error</i> (12,5 Ω)	<i>Error</i> (15 Ω)	<i>Error</i> (17,5 Ω)	<i>Error</i> (20 Ω)
100	0,5	0,6	0,8	0,9
200	9,8	10	10,4	10,6
300	18,1	19,3	20,5	20,7
600	32,5	32,6	32,7	33,9
500	30,1	30,6	31,7	33
400	23,9	24,2	25,9	26
800	45,5	46,4	46,8	47,9
1000	61	62,5	63,6	64,8
700	40,3	41,9	42,7	43,3
900	53,6	54,1	55,1	56,5
<i>Error</i> Rata-Rata	31,53	32,22	33,02	33,76

Nilai daya keluaran mengalami penurunan jika beban bertambah pada PV tanpa MPPT. Penurunan nilai daya dipengaruhi oleh bertambahnya beban pada PV. Penambahan beban berpengaruh pada penurunan nilai daya keluaran pada PV tanpa MPPT. Nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban antara 31,53 Watt – 33,76 Watt sehingga PV tidak dapat bekerja pada daerah maksimal. Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa menggunakan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.19 berikut ini.



Gambar 4.19 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

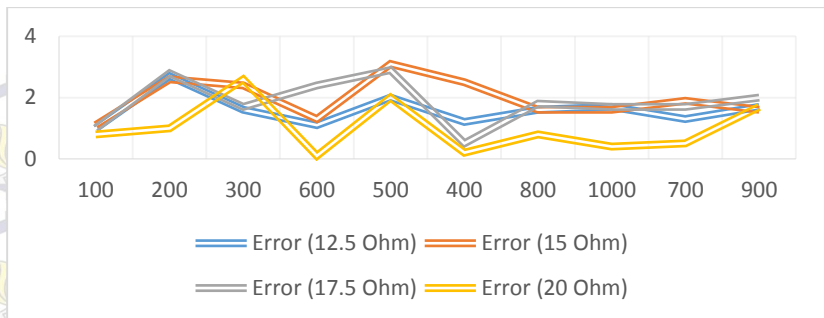
4.6.2 Analisis dan Perbandingan *Error* Daya PV Dengan MPPT Pada Semua Nilai Beban

Selanjutnya akan dibandingkan nilai *error* daya pada semua nilai beban. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan nilai beban terhadap nilai efisiensi PV pada tiap *irradiance*. *Error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.13 berikut ini.

Tabel 4.13 Data nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	<i>Error</i> (12,5 Ω)	<i>Error</i> (15 Ω)	<i>Error</i> (17,5 Ω)	<i>Error</i> (20 Ω)
100	1	1,1	1	0,8
200	2,7	2,6	2,8	1
300	1,6	2,4	1,7	2,6
600	1,1	1,3	2,4	0,1
500	2	3,1	2,9	2
400	1,2	2,5	0,5	0,2
800	1,6	1,6	1,8	0,8
1000	1,7	1,6	1,7	0,4
700	1,3	1,9	1,7	0,5
900	1,7	1,6	2	1,7
<i>Error</i> Rata-Rata	1.53	2.00	1.84	1.04

Pada Tabel 4.13 didapatkan bahwa nilai efisiensi rata-rata dari PV berubah seiring bertambahnya beban. Nilai *error* daya terendah didapatkan pada beban 20 Ω dan tertinggi pada beban 15 Ω . Pada beban 20 Ω didapatkan nilai *error* daya sebesar 1,04 Watt dan pada beban 15 Ω didapatkan nilai *error* daya sebesar 2 Watt. Pada beban 12,5 Ω didapatkan nilai *error* daya sebesar 1,53 Watt dan pada beban 17,5 Ω didapatkan nilai *error* sebesar 1,84Watt. Gambar grafik perbandingan nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Gambar 4.20 berikut ini.



Gambar 4.20 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

Dari Tabel 4.13 dapat dijelaskan bahwa nilai *error* daya PV dengan MPPT antara 1,04 Watt - 2 Watt sehingga nilai daya rata-rata yang dihasilkan PV antara 98 Watt – 98,96 Watt. Perubahan nilai beban mempengaruhi nilai daya keluaran dan *error* daya PV.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan simulasi Tugas Akhir yang telah dilakukan, diperoleh beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan sebagai berikut.

1. Perubahan nilai *irradiance* dan nilai beban pada PV dapat mempengaruhi nilai daya keluaran dan *error* daya yang dihasilkan.
2. Kinerja PV sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari (*irradiance*) dan beban sehingga dibutuhkan suatu metode untuk mengoptimisasi agar PV dapat bekerja pada daerah maksimal.
3. Proses optimisasi daya keluaran pada penelitian ini, digunakan metode *firefly algorithm*.
4. *Firefly algorithm* digunakan untuk menala parameter K_p , K_i , dan K_d pada *PID Controller*. Nilai K_p , K_i , dan K_d berubah-ubah sesuai dengan nilai beban pada PV.
5. Nilai *error* daya PV tanpa MPPT antara 31,53 Watt – 33,76 Watt. Sedangkan, nilai efisiensi rata-rata PV dengan MPPT antara 1,04 Watt - 2 Watt. Dalam hal ini, MPPT dapat bekerja cukup baik untuk meningkatkan nilai daya keluaran PV.

5.2 Saran

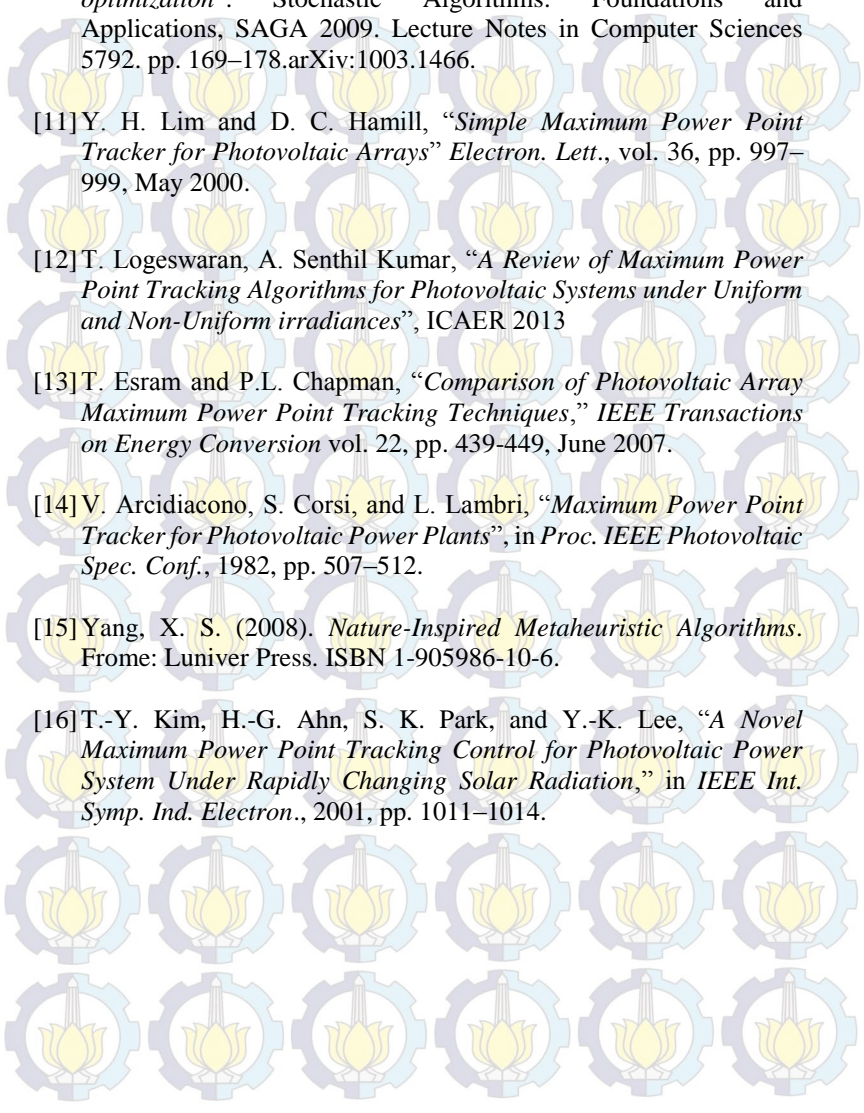
Saran yang dapat diberikan dalam perbaikan dan pengembangan lebih lanjut terhadap penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Selain metode penalaan *firefly algorithm* untuk menala *PID controller*, dapat juga digunakan metode kecerdasan buatan lainnya untuk mengetahui perbandingannya dengan metode *firefly algorithm* ini.
2. MPPT yang digunakan juga perlu diuji coba pada sistem yang lebih besar untuk dibandingkan dengan sistem yang digunakan pada penelitian ini.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi, "*Modern Power System Control*", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2009.
- [2] Imam Robandi, "*Desain Sistem Tenaga Modern: Optimasi, Logika Fuzzy, dan Algoritma Genetika*", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2006.
- [3] Ashari, Muhammad, "*Sistem Konverter DC, Desain Rangkaian Elektronika Daya*", ITS Press, Surabaya, 2012.
- [4] Seno Aji, "*Desain Dan Implementasi Kontrol Maximum Power Point Tracking (Mppt) Dengan Menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC) Pada Sistem Photovoltaic (PV) Solar Car*", Tugas Akhir, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia 2014.
- [5] Gilbert M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Stanford University, A John Wiley & Sons, Inc., Publication 2004
- [6] Ahmad El Khateb, Nasrudin Abdul Rahim, Jeyraj Selvaraj, "*Optimized PID Controller for Both Single Phase Inverter and MPPT SEPIC DC/DC Converter of PV*", IEEE, 2011
- [7] Dnyaneshwar S. Karanjkar, S. Chatterji, Shimi S. L, Amod Kumar, "*An Improved Current Feedback Based Maximum Power Point Tracking Controller for Solar Photovoltaic System*", ICMiCR, 2013
- [8] M.A.A. Mohd Zainuri, M.A.Mohd Radzi, Azura Che Soh, N.Abdul Rahim, "*Adaptive P&O-Fuzzy Control MPPT for PV Boost DC-DC Converter*", IEEE, 2012
- [9] P. Siva Subramanian and R. Kayalvizhi, "*An Optimum Setting of PID Controller for Boost Converter Using Bacterial Foraging Optimization Technique*", Springer, Jerman, 2013

- 
- [10] Yang, X. S. (2009). "*Firefly algorithms for multimodal optimization*". Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Sciences 5792. pp. 169–178.arXiv:1003.1466.
- [11] Y. H. Lim and D. C. Hamill, "*Simple Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays*" *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 997–999, May 2000.
- [12] T. Logeswaran, A. Senthil Kumar, "*A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems under Uniform and Non-Uniform irradiances*", ICAER 2013
- [13] T. Esmar and P.L. Chapman, "*Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*," *IEEE Transactions on Energy Conversion* vol. 22, pp. 439–449, June 2007.
- [14] V. Arcidiacono, S. Corsi, and L. Lambri, "*Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power Plants*", in *Proc. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, 1982, pp. 507–512.
- [15] Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Frome: Luniver Press. ISBN 1-905986-10-6.
- [16] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, "*A Novel Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic Power System Under Rapidly Changing Solar Radiation*," in *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, 2001, pp. 1011–1014.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan simulasi Tugas Akhir yang telah dilakukan, diperoleh beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan sebagai berikut.

1. Perubahan nilai *irradiance* dan nilai beban pada PV dapat mempengaruhi nilai daya keluaran dan *error* daya yang dihasilkan.
2. Kinerja PV sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari (*irradiance*) dan beban sehingga dibutuhkan suatu metode untuk mengoptimisasi agar PV dapat bekerja pada daerah maksimal.
3. Proses optimisasi daya keluaran pada penelitian ini, digunakan metode *firefly algorithm*.
4. *Firefly algorithm* digunakan untuk menala parameter K_p , K_i , dan K_d pada *PID Controller*. Nilai K_p , K_i , dan K_d berubah-ubah sesuai dengan nilai beban pada PV.
5. Nilai *error* daya PV tanpa MPPT antara 31,53 Watt – 33,76 Watt. Sedangkan, nilai efisiensi rata-rata PV dengan MPPT antara 1,04 Watt - 2 Watt. Dalam hal ini, MPPT dapat bekerja cukup baik untuk meningkatkan nilai daya keluaran PV.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dalam perbaikan dan pengembangan lebih lanjut terhadap penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Selain metode penalaan *firefly algorithm* untuk menala *PID controller*, dapat juga digunakan metode kecerdasan buatan lainnya untuk mengetahui perbandingannya dengan metode *firefly algorithm* ini.
2. MPPT yang digunakan juga perlu diuji coba pada sistem yang lebih besar untuk dibandingkan dengan sistem yang digunakan pada penelitian ini.





ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**MAXIMUM POWER POINT TRACKING OPTIMIZED BY
FIREFLY ALGORITHM ON PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR
SOLAR CAR**

Dwi Didit Prasetyo
NRP 2210 100 165

Supervisor
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

Optimisasi *Maximum Power Point Tracking* Menggunakan *Firefly Algorithm* Pada *Photovoltaic System* Untuk Mobil Surya

Dwi Didit Prasetyo
2210 100 165

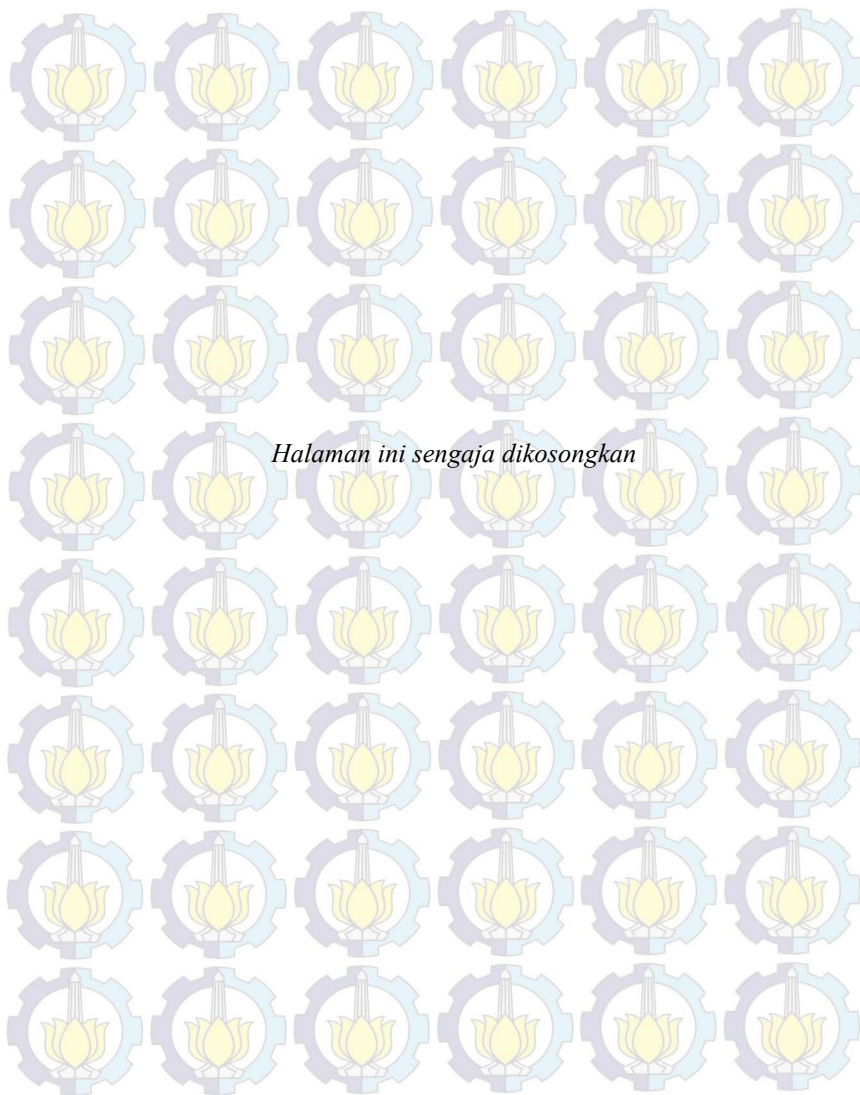
Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
Dosen Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

Abstrak:

Maximum Power Point Tracking merupakan metode untuk menghasilkan keluaran daya terbesar pada *photovoltaic system*. Prinsip kerja MPPT adalah mengatur nilai daya keluaran PV (*photovoltaic*) sehingga mendekati nilai maksimum. Pengaturan dan optimasi nilai daya menggunakan *Firefly Algorithm* yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang. Proses *tunning* menggunakan *PID Controller*. Parameter yang diatur dan dioptimisasi adalah daya keluaran. Nilai ini didapatkan dari perkalian antara nilai tegangan dan nilai arus. Nilai daya ini dibandingkan dengan nilai daya maksimum PV. Output dari MPPT adalah *duty cyle* yang berfungsi mengatur *Boost Converter* agar menghasilkan daya pada daerah operasi maksimum.

Simulasi dijalankan dengan Matlab Simulink. PV *system* yang digunakan adalah PV pada mobil surya yang berfungsi sebagai sumber daya. Pada simulasi tersebut dibandingkan seberapa besar pengaruh *firefly algorithm* pada daya keluaran PV. Faktor rugi daya dan faktor ekonomis diabaikan pada simulasi ini.

Kata kunci: *Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic System, Firefly Algorithm, Duty Cyle, Boost Converter*



Maximum Power Point Tracking Optimized by Firefly Algorithm on Photovoltaic System for Solar Car

Dwi Didit Prasetyo
2210 100 165

Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

Supervisor II : Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

Abstract:

Maximum Power Point Tracking (MPPT) is the way to get the maximum power on photovoltaic system. The principal of MPPT is set up the output value of photovoltaic power to approach the maximum value of solar module specification. This optimization is using firefly algorithm that inspired by firefly characteristic. Proportional, Integral, Derivative Controller (PID Controller) is used for tuning purpose. It set up the power output which gets from best voltage value. This system uses boost converter. It uses to increase the voltage to the value that have been set. This power output is compared to the maximum power of photovoltaic system. PID controller is used to control the duty cycle value. It work based on firefly algorithm. So, photovoltaic system can work on maximum power.

This simulation is running on Simulink. The result is a comparison of PV system under various sun irradiance and load. This PV power is used for solar car. The analytical data is shown to prove that PV system can works on maximal power with firefly algorithm. Power loss and economical factor is ignored in this simulation.

Keywords : *Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic System, Firefly Algorithm, Duty Cycle, Boost Converter*



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah yang telah memberikan pertolongan dan kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

Optimisasi *Maximum Power Point Tracking* Menggunakan *Firefly Algorithm* Pada *Photovoltaic System* Untuk Mobil Surya

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang studi teknik sistem tenaga Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, terutama kepada :

1. Kedua orang tua yang telah memberikan doa, motivasi, bimbingan, dan nasehat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, kritik, saran dan motivasi kepada penulis saat menjadi anggota laboratorium PSOC maupun selama menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, pengarahan dan koreksi kepada penulis mulai dari analisis data, penyusunan proposal sampai penyelesaian dari Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Kajar Teknik Elektro ITS dan seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan bimbingan dan ilmu pengetahuan selama perkuliahan.
5. Sahabat dan rekan saya Rian Wahyu, Suharto, Rodhi, Mas Tufiq Ramadhan, Mas Herlambang Setiadi, Mas Fani, Mas Candra P, Mas Afif, Mas Wandu, Ibu Hidayatul Nurrohman, Bapak Otong, Bapak Aji, Bapak Andi Imran, Bapak Dani, teman-teman e50 dan semua teman-teman laboratorium PSOC yang telah membantu memberi saran, kritikan, dan motivasi serta bersedia berdiskusi selama penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis berharap semoga apa yang ada dalam Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca terutama mahasiswa Teknik Elektro.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	1
1.3. Permasalahan	2
1.4. Batas Masalah	2
1.5. Metode Penelitian	2
1.6. Sistematika Penulisan	3
1.7. Relevansi	3
BAB 2 TEORI PENUNJANG	5
2.1. <i>Photovoltaic</i> (PV)	5
2.1.1. Rangkain Ekvivalen PV	7
2.1.2. Kurva Karakteristik PV	7
2.2. <i>Boost Converter</i>	10
2.3. <i>Maximum Power Point Tracking</i>	13
2.4. <i>Firefly Algorithm</i> (Algoritma Kunang-Kunang)	14
2.4.1. <i>Attractiveness</i> (Daya Tarik)	14
2.4.2. <i>Distance</i> (Jarak)	15
2.4.3. <i>Movement</i> (Pergerakan Kunang-Kunang)	15
2.5. MPPT Menggunakan <i>Firefly Algorithm</i>	16
2.6. Kontroler PID	16
2.3.1. Kontroler Proporsional	16
2.3.2. Kontroler Integral	17
2.3.3. Kontroler Diferensial	17
2.8. Mobil Surya (<i>Solar Car</i>)	19

BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA	23
3.1. Metodologi Penelitian	23
3.2. Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan	24
3.2.1. Pemodelan PV	25
3.2.2. Pemodelan Boost Converter	27
3.2.2. Pemodelan Photovoltaic System	29
3.2.4. <i>Pulse Wave Modulation</i> Untuk <i>Boost Converter</i>	30
3.3. Metode <i>Firefly Algorithm</i>	30
3.4. Simulasi Sistem	36
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	41
4.1. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 12.5 Ω	42
4.2. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 15 Ω	46
4.3. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 17.5 Ω	50
4.4. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 20 Ω	54
4.5. Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Semua Nilai Beban	58
4.6. Analisis dan Perbandingan <i>Error</i> Daya PV Pada Semua Nilai Beban	62
BAB 5 PENUTUP	65
5.1. Kesimpulan	65
5.2. Saran	
DAFTAR PUSTAKA	xix
INDEKS	xxi
RIWAYAT HIDUP	xxiii

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi PV Untuk Mobil Suryawangsa	20
Tabel 3.1 Spesifikasi modul PV	25
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>boost converter</i>	28
Tabel 3.3 Parameter <i>Firefly Algorithm</i>	32
Tabel 3.4 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 12,5 Ohm	33
Tabel 3.5 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 15 Ohm	34
Tabel 3.6 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 17,5 Ohm	35
Tabel 3.7 Parameter <i>PID Controller</i> pada beban 20 Ohm	35
Tabel 4.1 Data karakteristik daya PV	41
Tabel 4.2 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 12,5 Ohm	43
Tabel 4.3 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 12,5 Ohm	44
Tabel 4.4 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 15 Ohm	47
Tabel 4.5 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 15 Ohm	48
Tabel 4.6 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 17,5 Ohm	51
Tabel 4.7 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 17,5 Ohm	53
Tabel 4.8 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada beban 20 Ohm	55
Tabel 4.9 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada beban 20 Ohm	56
Tabel 4.10 Perbandingan daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban	59
Tabel 4.11 Perbandingan daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban	61
Tabel 4.12 Data <i>error</i> daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban	62
Tabel 4.13 Data <i>error</i> daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban	64



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Sederhana dari PV	7
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Kompleks dari PV	7
Gambar 2.3 <i>Open Circuit Voltage</i> dan <i>Short Circuit Voltage</i>	8
Gambar 2.4 Kurva karakteristik PV	8
Gambar 2.5 Pengaruh beban yang bervariasi terhadap daya keluaran <i>photovoltaic</i>	9
Gambar 2.6 Pemasangan <i>photovoltaic</i> secara seri	9
Gambar 2.7 Pemasangan PV secara paralel	10
Gambar 2.8 Rangkaian <i>Boost Converter</i>	10
Gambar 2.9 <i>Boost Converter</i> dalam kondisi saklar terhubung	11
Gambar 2.10 <i>Boost Converter</i> dalam kondisi saklar terbuka	12
Gambar 2.11 Prinsip Kerja MPPT	13
Gambar 2.12 Blok diagram sinyal kontroler proporsional	17
Gambar 2.13 Modulasi sinyal PWM pada <i>boost converter</i>	18
Gambar 2.14 Membangkitkan sinyal PWM dengan sinyal gigi gergaji	19
Gambar 2.15 Mobil Listrik Suryawangsa	19
Gambar 3.1 Metodologi Penelitian	24
Gambar 3.2 MPPT berbasis PID dengan <i>Firefly Algorithm</i>	25
Gambar 3.3 Pemodelan <i>photovoltaic</i>	26
Gambar 3.4 Kurva V-I pada berbagai nilai <i>irradiance</i> dari 100 W/m ² sampai 1000 W/m ²	27
Gambar 3.5 Kurva P-V pada berbagai nilai <i>irradiance</i> dari 100 W/m ² sampai 1000 W/m ²	27
Gambar 3.6 Permodelan <i>Boost Converter</i>	28
Gambar 3.7 <i>Photovoltaic System</i> menggunakan <i>boost converter</i>	29
Gambar 3.8 Diagram alur metode <i>firefly algorithm</i>	31
Gambar 3.9 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 12,5 Ω	32
Gambar 3.10 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 15 Ω	33
Gambar 3.11 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 17,5 Ω	34
Gambar 3.12 Grafik konvergensi <i>firefly algorithm</i> pada beban 20 Ω	35
Gambar 3.13 Blok diagram perbandingan MPPT	37

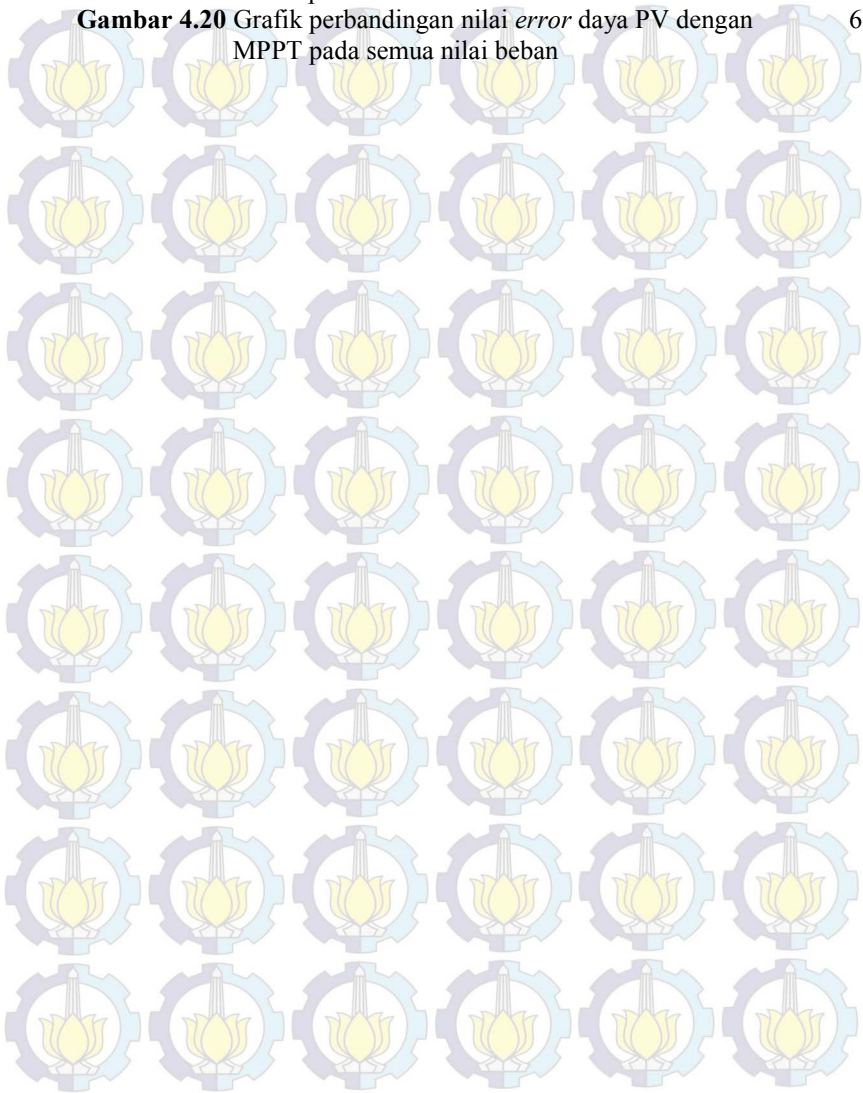
Gambar 3.14	Pemodelan MPPT berbasis <i>PID controller</i> dengan <i>firefly algorithm</i>	38
Gambar 3.15	Diagram blok MPPT pada Matlab Simulink	39
Gambar 3.16	Kurva karakteristik PV	39
Gambar 4.1	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 12.5Ω	42
Gambar 4.2	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 12.5Ω	44
Gambar 4.3	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 12.5Ω	45
Gambar 4.4	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 12.5Ω	46
Gambar 4.5	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 15Ω	47
Gambar 4.6	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 15Ω	48
Gambar 4.7	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 15Ω	49
Gambar 4.8	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 15Ω	50
Gambar 4.9	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 17.5Ω	51
Gambar 4.10	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 17.5Ω	52
Gambar 4.11	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 17.5Ω	53
Gambar 4.12	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 17.5Ω	54
Gambar 4.13	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban 20Ω	55
Gambar 4.14	Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 20Ω	56
Gambar 4.15	Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 20Ω	57
Gambar 4.16	Grafik perbandingan <i>error</i> daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 20Ω	58
Gambar 4.17	Grafik perbandingan nilai daya tanpa MPPT pada semua nilai beban	60
Gambar 4.18	Grafik perbandingan nilai daya dengan MPPT pada semua nilai beban	61

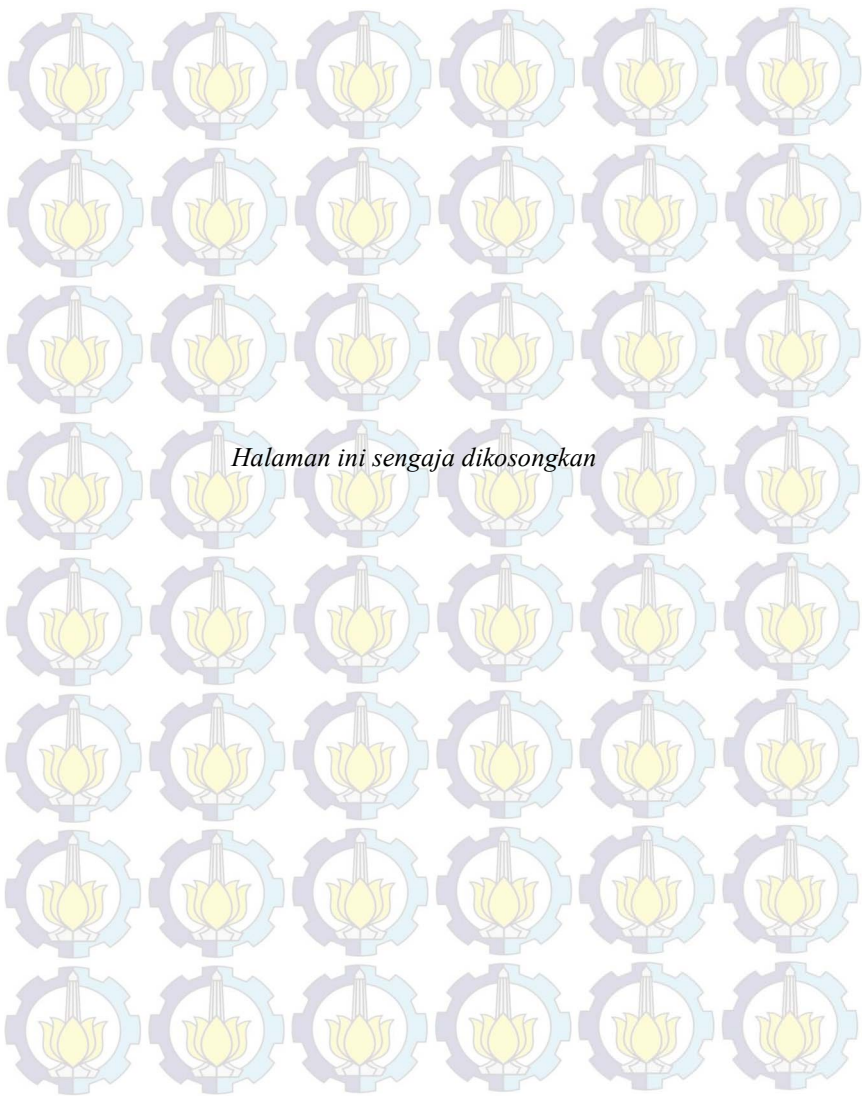
Gambar 4.19 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

63

Gambar 4.20 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

65

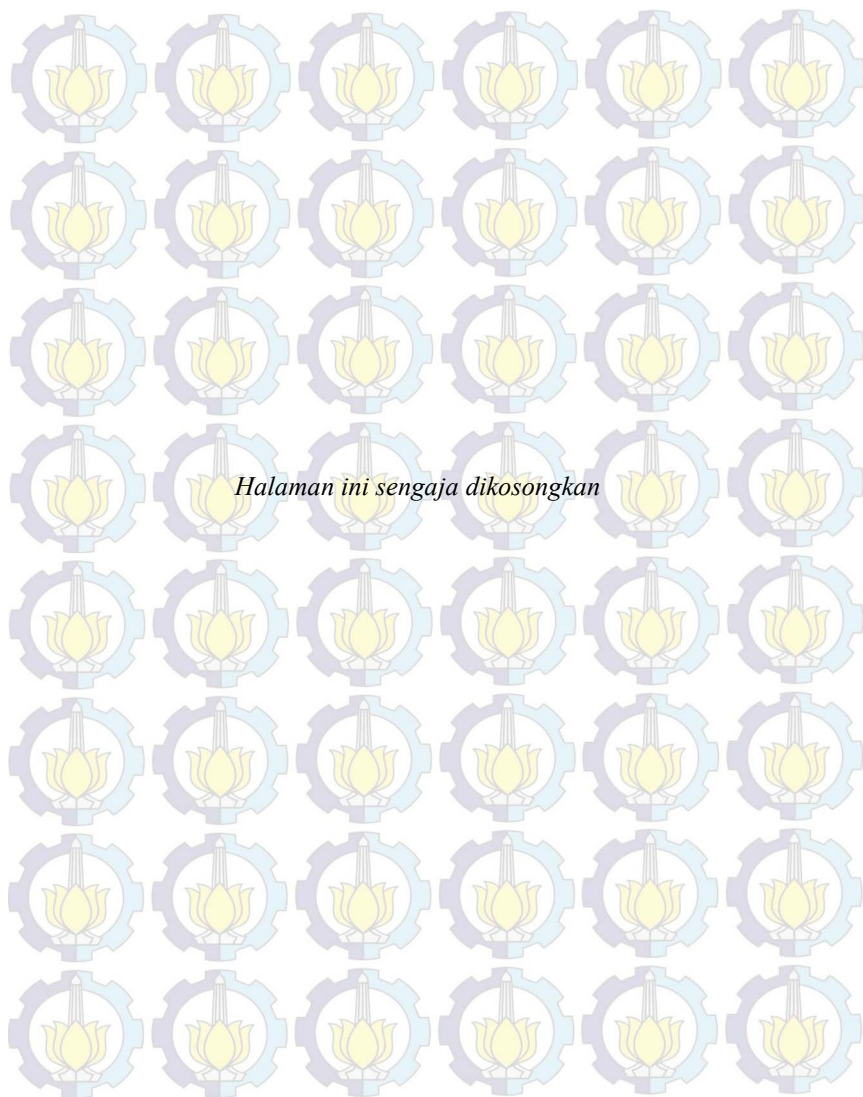




Halaman ini sengaja dikosongkan

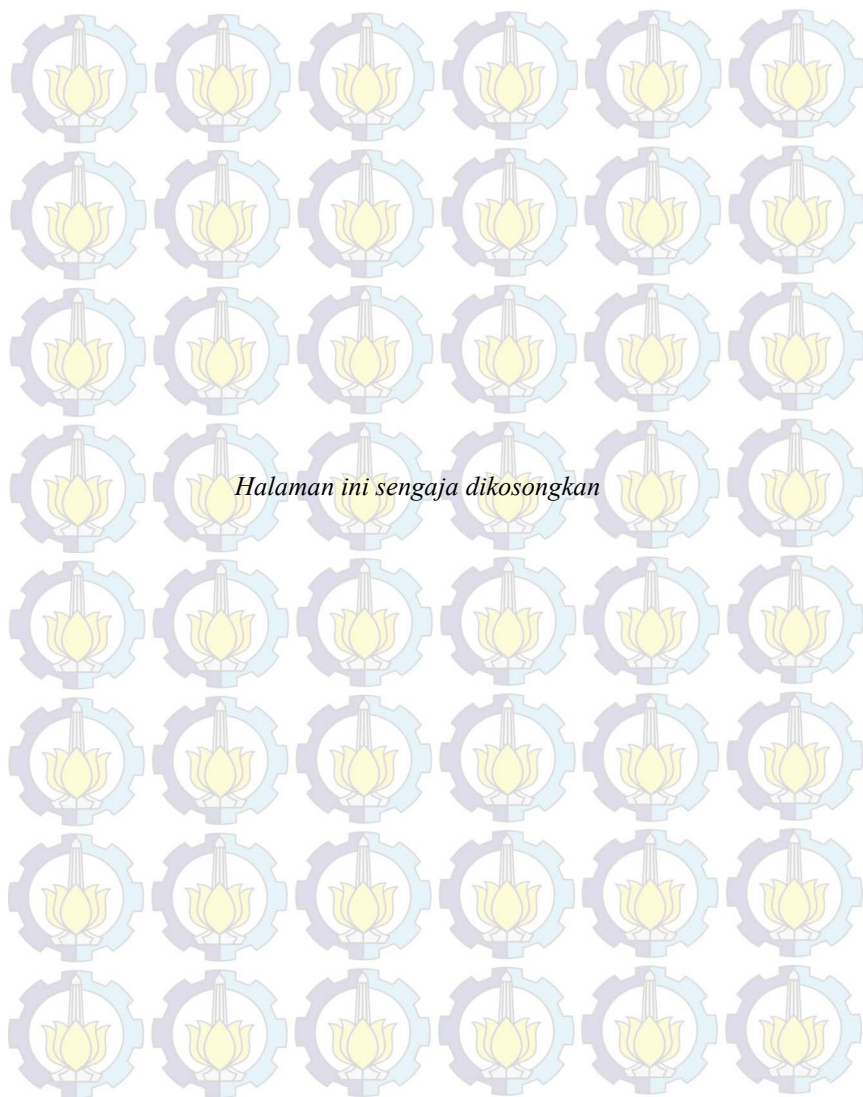
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

PV	: <i>Photovoltaic</i>
PID	: <i>Proportional Integral Differential</i>
FA	: <i>Firefly Algorithm</i>
ITAE	: <i>Integral Time Absolute Error</i>
MPPT	: <i>Maximum Power Point Tracking</i>
MPP	: Maximum Power Point (Titik daya maksimum)
k	: <i>Duty Cycle</i>
T	: <i>Temperature</i>
I_D	: Arus dioda
R_s	: Hambatan seri
I_L	: Hambatan parallel
V	: Tegangan
V_s	: Tegangan sumber
V_R	: Tegangan resistor
V_L	: Tegangan beban
V_{oc}	: Tegangan <i>open circuit</i>
I	: Arus
I_{sc}	: Arus <i>short circuit</i>
FF	: <i>Fii Factor</i>
P	: Daya
P_{max}	: Daya maksimal PV
P_{mppt}	: Daya keluaran MPPT
$P_{uncontrolled}$: Daya keluaran tanpa MPPT
T	: Periode
t_{on}	: Waktu saklar terhubung
t_{off}	: Waktu saklar terbuka
C	: Kapasitor
L	: Induktor
ΔI	: Perubahan arus
ΔV	: Perubahan tegangan
R	: Resistor
K_p	: Konstanta <i>proportional</i>
K_i	: Konstanta <i>integral</i>
K_d	: Konstanta <i>differential</i>



DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

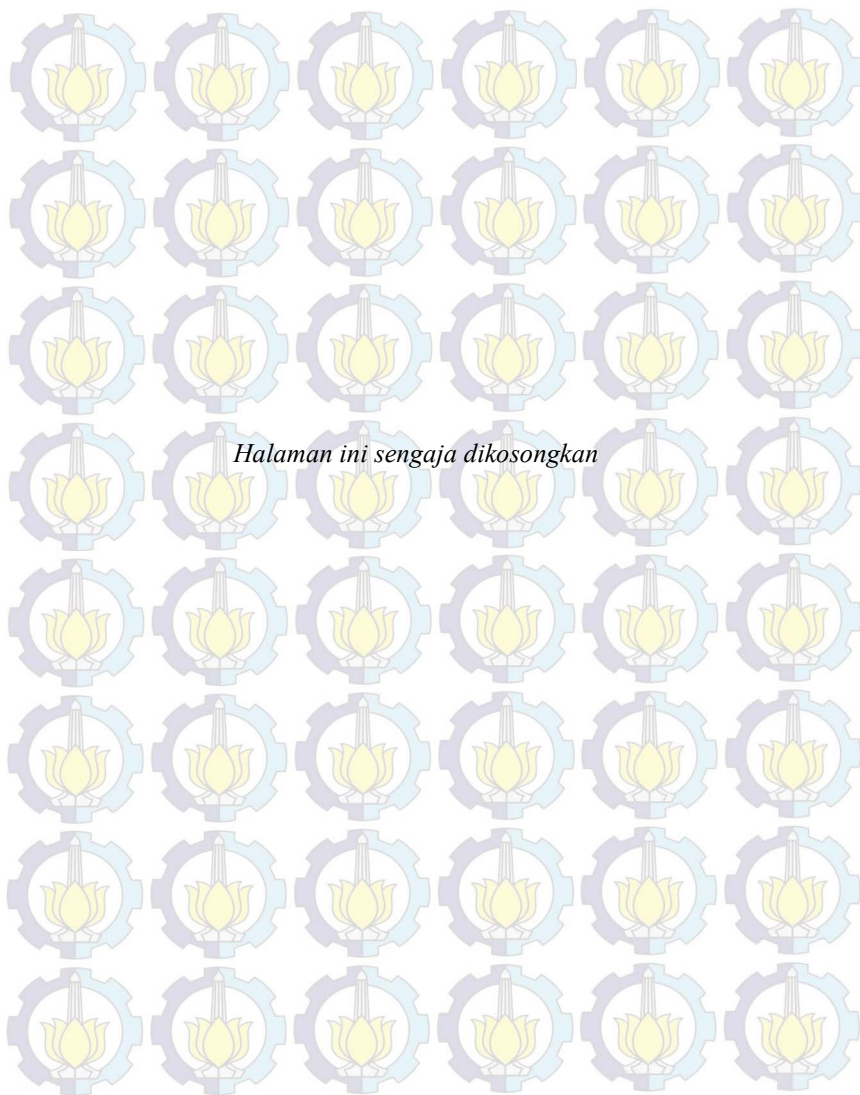
PV	: <i>Photovoltaic</i>
PID	: <i>Proportional Integral Differential</i>
FA	: <i>Firefly Algorithm</i>
ITAE	: <i>Integral Time Absolute Error</i>
MPPT	: <i>Maximum Power Point Tracking</i>
MPP	: Maximum Power Point (Titik daya maksimum)
k	: <i>Duty Cycle</i>
T	: <i>Temperature</i>
I_D	: Arus dioda
R_s	: Hambatan seri
I_L	: Hambatan parallel
V	: Tegangan
V_s	: Tegangan sumber
V_R	: Tegangan resistor
V_L	: Tegangan beban
V_{oc}	: Tegangan <i>open circuit</i>
I	: Arus
I_{sc}	: Arus <i>short circuit</i>
FF	: <i>Fii Factor</i>
P	: Daya
P_{max}	: Daya maksimal PV
P_{mppt}	: Daya keluaran MPPT
$P_{uncontrolled}$: Daya keluaran tanpa MPPT
T	: Periode
t_{on}	: Waktu saklar terhubung
t_{off}	: Waktu saklar terbuka
C	: Kapasitor
L	: Induktor
ΔI	: Perubahan arus
ΔV	: Perubahan tegangan
R	: Resistor
K_p	: Konstanta <i>proportional</i>
K_i	: Konstanta <i>integral</i>
K_d	: Konstanta <i>differential</i>



RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama lengkap Dwi Didit Prasetyo adalah anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Mariyoto dan Ibu Siti Maftuchah, yang lahir di Bojonegoro, 13 Agustus 1992. Penulis memulai jenjang pendidikan sekolah dasar di SDN Sambeng 2 Kecamatan Kasiman, Bojonegoro. Setelah lulus sekolah dasar tahun 2004, penulis melanjutkan sekolah ke SMP Negeri 2 Cepu, Kabupaten Blora dan lulus tahun 2007. Kemudian, penulis melanjutkan sekolah di SMA 1 Cepu, Kabupaten Blora. Setelah lulus dari SMA 1 Cepu pada tahun 2010, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Teknik Elektro dan mengambil konsentrasi bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis juga aktif dalam berbagai kegiatan selama menempuh studi S1 yaitu BEM ITS dan anggota dari Laboratorium PSOC (*Power System Operation and Control*) Teknik Elektro ITS. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email : dwi.didit.prasetyo10@mhs.ee.its.ac.id.



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan manusia akan kendaraan atau transportasi menjadi sangat penting untuk mendukung kehidupan sehari-hari. Dengan semakin meningkatnya kebutuhan transportasi, maka tentu saja penggunaan energi juga meningkat. Sumber energi yang terbatas seperti minyak bumi, mendorong diperlukannya inovasi untuk menemukan energi alternatif demi mengatasi permasalahan krisis energi di masa depan. Keberadaan sumber energi matahari yang melimpah merupakan solusi energi alternatif yang layak untuk dipertimbangkan. Mobil surya merupakan salah satu cara untuk memaksimalkan potensi energi matahari yang melimpah. Dengan optimisasi daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic system*, kinerja mobil surya juga dapat lebih baik.

Mobil surya memiliki permasalahan pada performa daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic*. Daya yang dihasilkan seringkali tidak stabil jika suhu dan intensitas matahari juga tidak stabil. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode untuk memaksimalkan daya keluaran dari *photovoltaic*. Untuk memaksimalkan daya listrik yang dihasilkan diperlukan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT ini juga perlu dioptimisasi. Output dari MPPT ini adalah *duty cycle* yang digunakan untuk mengatur kerja dari Boost Converter.

Firefly Algorithm digunakan untuk memaksimalkan *output* daya agar berada pada daerah maksimum (*Maximum Power Point*). Parameter *firefly algorithm* akan diatur sedemikian rupa menggunakan *Proportional, Integral, and Derivative Controller* (*PID Controller*). *Firefly algorithm* terinspirasi oleh perilaku kunang-kunang. Kombinasi antara *firefly algorithm* dan *PID controller* menentukan nilai *duty cycle*. Nilai inilah yang mempengaruhi daya keluaran dari *photovoltaic*.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Menentukan permodelan MPPT berbasis *PID controller* yang nilai parameter K_p , K_i , dan K_d ditala dengan *firefly algorithm*.

2. Mendapatkan perbandingan daya keluaran antara *photovoltaic system* menggunakan MPPT dan tanpa MPPT dalam berbagai kondisi intensitas cahaya matahari dan berbagai nilai beban.

1.3 Permasalahan

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana menentukan permodelan MPPT berbasis *PID controller* yang dioptimisasi menggunakan *firefly algorithm*.
2. Bagaimana perbandingan daya keluaran antara *photovoltaic system* tanpa MPPT dan dengan MPPT dalam berbagai kondisi intensitas cahaya matahari dan pada berbagai nilai beban.

1.4 Batasan Masalah

Batas masalah dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem menggunakan *PID controller*
2. *Irradiance* berubah-ubah dan temperatur konstan 25°C
3. Perubahan beban dari 12,5 Ω sampai 20 Ω
4. Faktor ekonomis tidak diperhitungkan
5. Simulasi menggunakan Matlab Simulink dan PSIM yang diintegrasikan dengan *SIM Coupler*
6. Faktor rugi daya diabaikan
7. Faktor *ripple* diabaikan

1.5 Metode Penelitian

Pada Tugas Akhir ini ditentukan permodelan MPPT beserta parameter yang akan dioptimisasi. Daerah operasi maksimum digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan daya maksimal pada sistem. Rangkaian *schematic* dibuat pada PSIM dan *firefly algorithm* dijalankan pada Matlab Simulink. Dengan menentukan daya maksimal *photovoltaic*, maka diperoleh daya keluaran rata-rata yang harus dihasilkan dengan MPPT.

Nilai tegangan dan nilai arus dioptimisasi menggunakan *firefly algorithm*. Algoritma ini bekerja dengan cara eksplorasi dan eksploitasi semua parameter yang ada. *PID controller* digunakan sebagai parameter *controller* agar pencarian berada pada solusi optimal. Rangkaian *photovoltaic system* pada simulink terdiri dari modul *photovoltaic*, *boost-converter*, dan beban resistor.

Pada Simulink terdapat blok diagram PID controller yang dihubungkan dengan *boost converter*. Sistem disimulasikan untuk mendapatkan perbandingan daya keluaran antara *photovoltaic system* tanpa MPPT dan dengan MPPT dalam berbagai kondisi intensitas cahaya matahari dan berbagai nilai beban.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut,

Bab 1 : Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2 : Dasar teori yang merupakan penjelasan teori mengenai *photovoltaic module*, *boost converter*, *firefly algorithm*, *PID controller*, dan mobil surya

Bab 3 : Penjelasan teori tentang optimisasi MPPT dengan *firefly algorithm*.

Bab 4 : Hasil simulasi, analisis dan perbandingan *photovoltaic system* tanpa MPPT dan dengan MPPT

Bab 5 : Kesimpulan Tugas Akhir yang mengemukakan kesimpulan dari hasil pembahasan dan mengemukakan saran-saran sehubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut.

1. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan sistem sumber daya mobil surya
2. Dapat meningkatkan penguasaan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di bidang sistem tenaga bagi pengusul Tugas Akhir.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa sebagai Tugas Akhir.



BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Photovoltaic (PV)

PV dapat bekerja dengan adanya sinar matahari. PV terdiri dari peralatan semikonduktor dioda. PV bekerja menggunakan prinsip p-n junction, yaitu *junction* antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan elektron (muatan negatif) sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan *hole* (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan *hole* tersebut dapat terjadi dengan mendoping material dengan atom. Sebagai contoh untuk mendapatkan material silikon tipe-p, silikon didoping oleh atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon tipe-n, silikon didoping oleh atom fosfor.

Ketika ada cahaya yang menyentuh PV akan diserap oleh bahan semikonduktor dan terjadi pelepasan electron melalui *p-n junction semiconductor*. Elektron akan melewati lapisan bahan semikonduktor yang berbeda yang menyebabkan terjadinya perubahan sigma gaya pada bahan. Gaya tolak antar bahan semikonduktor menyebabkan aliran medan listrik dan menyebabkan elektron dapat disalurkan ke saluran awal dan akhir untuk digunakan pada peralatan listrik, sehingga terbangkit arus *Direct Current* (DC) [5].

PV memiliki berbagai macam kelebihan dan kekurangan. Kelebihan PV antara lain :

1. Sangat praktis dan cepat dalam hal perencanaan sampai dengan instalasi
2. Berbentuk modul sehingga sangat mudah dalam hal modifikasi untuk mendapatkan daya yang sesuai.
3. Perawatan sangat mudah.

Selain memiliki kelebihan, PV juga memiliki beberapa kekurangan, antara lain:

1. PV tidak dapat bekerja di malam hari sehingga membutuhkan tambahan kompoenen baterai sebagai media penyimpanan dan digunakan pada malam hari ketika tidak ada cahaya matahari.

2. Harga PV relatif mahal sehingga dibutuhkan biaya investasi yang besar

PV memiliki berbagai macam jenis yang digolongkan berdasarkan pada teknologi pembuatannya.

1. *Monocrystalline*

PV jenis ini merupakan jenis yang terbuat dari batangan kristal silikon murni yang dibelah atau diiris secara tipis-tipis. Kepingan-kepingan ini dibuat identik satu sama lain dan disusun menjadi satu sehingga menjadi satu buah modul PV. Efisiensi PV jenis ini adalah sekitar 15%-20%. PV jenis ini termasuk mahal harganya karena harga bahan baku kristal silikon murni juga mahal. Sel surya jenis ini umumnya berbentuk bulat atau segi enam sehingga jika disusun menjadi satu buah modul PV akan menyisakan banyak ruang kosong.

2. *Polycrystalline*

PV jenis ini terbuat dari bahan kristal silikon yang dileburkan kemudian dituangkan ke cetak dalam bentuk persegi. Hasil dari proses ini menyebabkan sel surya memiliki sifat tidak identik. Bentuknya yang persegi menyebabkan modul PV jenis ini tidak memiliki ruang kosong sama sekali. Efisiensi modul PV ini sekitar 13%-16%. Harganya relative lebih murah karena proses pembuatannya lebih mudah daripada jenis *monocrystalline*.

3. *Thin Film Solar Cell (TSFC)*

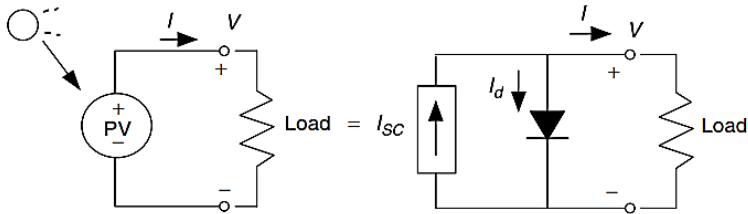
PV jenis TSFC memiliki lapisan khusus berupa lapisan material yang tipis dan fleksibel. Berdasarkan meterialnya sel surya jenis ini di bedkan menjadi beberapa jenis antara lain, *Amorphous Silicon* (a-Si), *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS), dan *Cadmium Telluride* (CdTe).

Teknologi produksi sel surya jenis *thin film* tergolong masih baru dan kemungkinan banyak digunakan di masa mendatang karena bentuknya yang tipis, ringan, dan fleksibel sehingga dapat dilekatkan pada berbagai bentuk permukaan. *Silicon Amorf* (a-Si) telah banyak digunakan sebagai bahan sumber energy pada kalkulator karena kualitasnya yang baik terutama dalam penyimpanan energi. Walaupun secara kinerja daya lebih rendah dibanding jenis (c-Si), namun hal ini bukan merupakan faktor penting karena kemampuan penyimpanan energi merupakan factor yang lebih penting bagi kinerja kalkulator. Di masa

depan aplikasi sel surya akan lebih beragam dalam berbagai alat-alat yang seringkita gunakan sehari-hari.

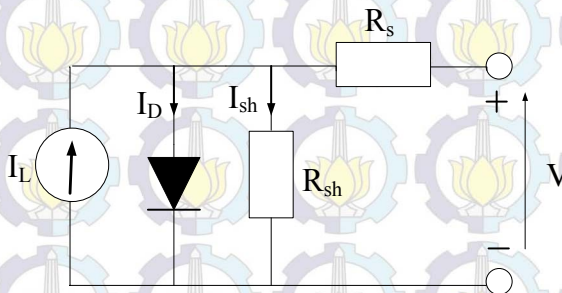
2.1.1 Rangkaian Ekuivalen PV

Sebuah PV dapat dimodelkan secara sederhana dengan sebuah sumber arus yang dipasang paralel dengan sebuah diode seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian ekuivalen sederhana dari PV

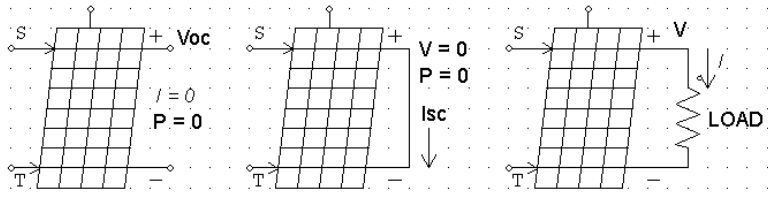
Pada rangkian PV yang lebih kompleks terdapat tambahan arus diode (I_D), hambatan seri (R_s), dan hambatan paralel (I_L)



Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen kompleks dari PV

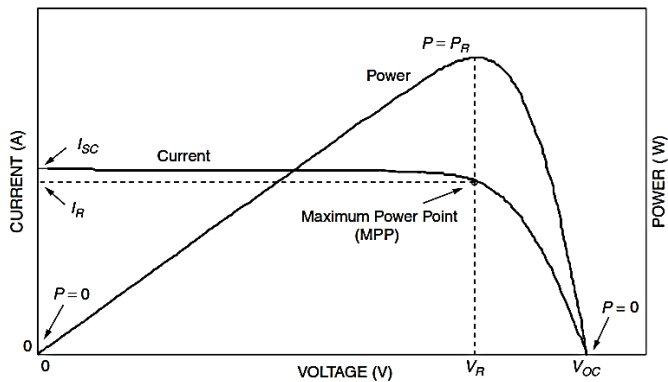
2.1.2 Kurva Karakteristik PV

Sebelum beban terhubung, modul PV menghasilkan *Open Circuit Voltage* (V_{oc}). Jika terminal *output* disambungkan, maka PV menghasilkan *Short Circuit Current* (I_{sc}). Pada kedua kondisi tidak ada beban yang terpasang seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Open Circuit Voltage* dan *Short Circuit Voltage*

Pengujian V_{oc} dan I_{sc} menghasilkan kurva karakteristik *PV* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



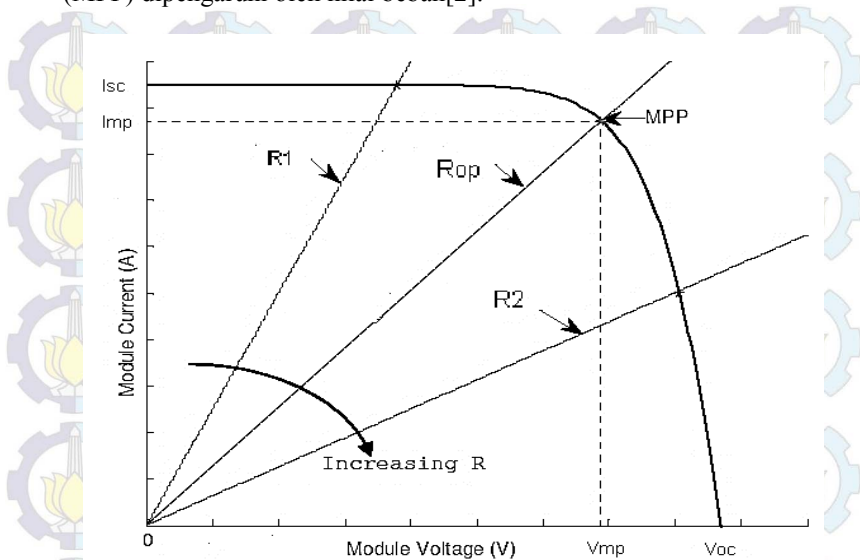
Gambar 2.4 Kurva karakteristik *PV*

Pada *PV* terdapat *Fill Factor* (FF) merupakan perbandingan antara nilai daya pada daerah operasi maksimum dengan luas persegi panjang yang dibentuk antara nilai V_{oc} dan I_{sc} . [5].

$$FF = \frac{\text{Power at Maximum Power Point}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.1)$$

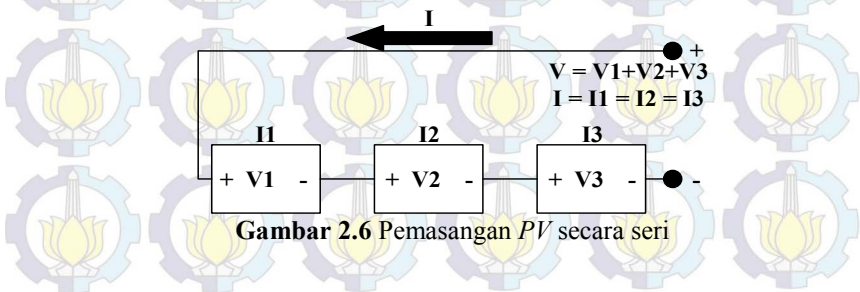
Temperatur dan intensitas cahaya matahari merupakan faktor yang berpengaruh terhadap daya keluaran *PV*. Nilai beban yang bervariasi dapat berpengaruh pada daya keluaran yang berbeda juga seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Beban yang berubah-ubah akan

mempengaruhi daya keluaran dari PV. Nilai *Maximum Power Point* (MPP) dipengaruhi oleh nilai beban[2].

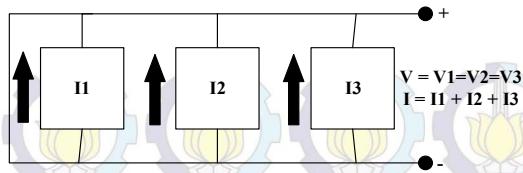


Gambar 2.5 Pengaruh beban yang bervariasi terhadap daya keluaran *PV*

PV dapat dipasang secara paralel maupun seri untuk mendapatkan daya keluaran yang diharapkan. Pemasangan PV secara seri dan paralel ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.



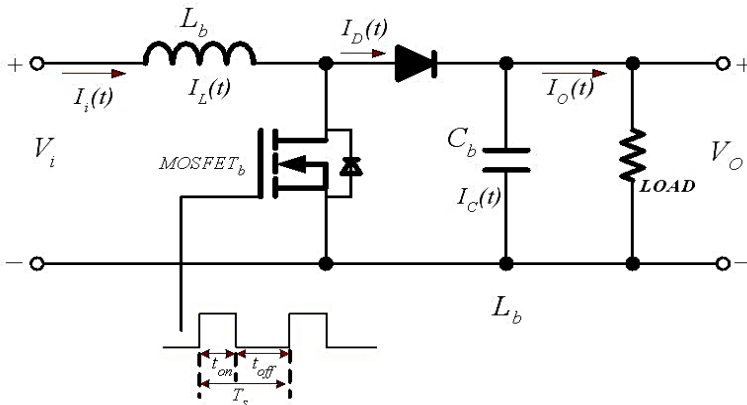
Gambar 2.6 Pemasangan *PV* secara seri



Gambar 2.7. Pemasangan PV secara paralel

2.2 Boost Converter

Ada berbagai macam jenis DC-DC Converter, antara lain, *Buck Converter* (menurunkan tegangan), *Boost Converter* (menaikkan tegangan), *Buck-Boost Converter* (menaikkan dan menurunkan tegangan), dan *Inverting Topology/Flyback* (membalikkan polaritas tegangan output). *Boost Converter* terdiri inductor, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET), dioda, dan kapasitor. Besar tegangan *output* dari *Boost Converter* tergantung dari *Duty Cycle*. Tegangan *output* besar daripada tegangan *input*. Sistem kerja *Boost Converter* berdasarkan pada switching MOSFET. Gambar rangkaian *Boost Converter* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



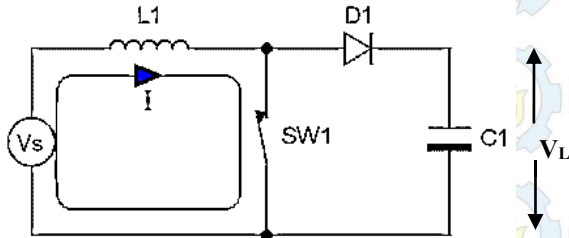
Gambar 2.8 Rangkaian *Boost Converter*

Prinsip kerja *Boost Converter* dijelaskan dalam dua mode yaitu [3] :

- Mode pengisian arus induktor (switching transistor dalam kondisi ON)

- Mode pengosongan arus induktor (*switching* transistor dalam kondisi OFF)

Pada saat saklar terhubung, induktor akan terisi arus, sementara tegangan $V_L = 0$, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Boost Converter dalam kondisi saklar terhubung

Diperoleh persamaan,

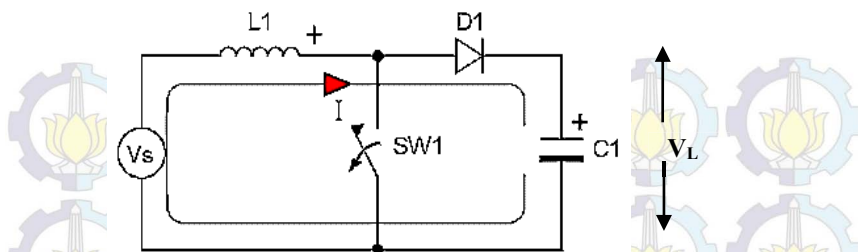
$$V_s = L \frac{dI}{dt} \quad (2.2)$$

Saklar terhubung pada selama t_{on} . Perubahan arus yang melewati induktor diasumsikan konstan, maka pada saat *switching on* menyala (t_{on}) berlaku persamaan sebagai berikut :

$$V_s = L \frac{\Delta I}{dt} \quad (2.3)$$

$$L \Delta I = V_s t_{on} \quad (2.4)$$

Pada saat saklar terbuka, induktor yang semula dalam mode pengisian arus menjadi mode pengosongan arus. Induktor menjadi sumber arus. Beban di suplai oleh dua sumber tegangan yaitu V_s dan V_L . Kondisi inilah yang menyebabkan tegangan *output* selalu lebih besar daripada tegangan *input*. Kondisi pada saat saklar terbuka, ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. *Boost Converter* dalam kondisi saklar terbuka

Saklar terbuka pada saat t_{off} sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$V_S + V_L = V_R \quad (2.5)$$

$$V_S + L \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_R \quad (2.6)$$

Persamaan (2.4) disubsitusikan ke persamaan (2.6) sehingga didapatkan,

$$V_S = V_S \frac{t_{on}}{t_{off}} + V_R \quad (2.7)$$

$$V_R = V_S + \left(1 - \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) \quad (2.8)$$

Duty Cycle (k) adalah rasio antara interval waktu saklar terhubung dengan periode dari sistem.

$$k = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.9)$$

$$t_{on} = k T \quad (2.10)$$

$$t_{off} = (1 - k) T \quad (2.11)$$

Persamaan (2.9) disubsitusikan ke persamaan (2.8) sehingga didapatkan,

$$V_R = V_S \frac{1}{(1-k)} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.12) untuk menghitung tegangan output dari *Boost Converter*. Dalam persamaan tersebut, induktor dan frekuensi switching tidak berpengaruh pada nilai tegangan *output*. Namun, kedua variabel ini

berpengaruh terhadap riak gelombang output. Riak arus dipengaruhi oleh nilai induktansi. Riak tegangan dipengaruhi oleh nilai kapasitansi. Persamaan hubungan antara riak arus dan nilai induktansi dijelaskan pada persamaan (2.13) berikut ini [2].

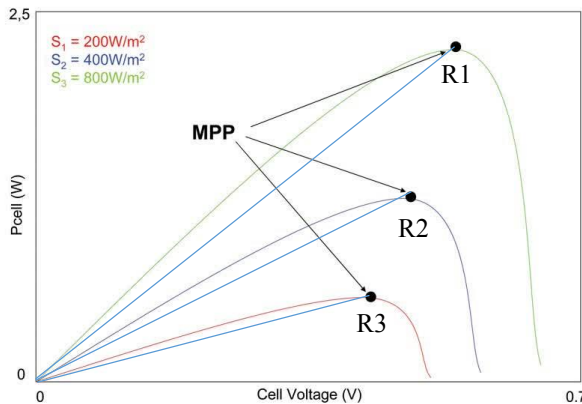
$$V_S = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (2.13)$$

Riak arus ΔI diperoleh dengan menentukan nilai induktansi terlebih dahulu. Perhitungan nilai kapasitansi digunakan persamaan pada saat saklar terbuka seperti pada persamaan (2.14) berikut ini.

$$\Delta V = V_{\max} \frac{t_{off}}{RC} \quad (2.14)$$

2.3 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum power point tracking (MPPT) merupakan suatu metode pada PV system untuk menghasilkan nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum sehingga dihasilkan daya *output* maksimum. MPPT berupa metode penelusuran secara elektronik dengan sebuah algoritma tertentu untuk mencari nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum [7].



Gambar 2.11 Prinsip Kerja MPPT

Pada Gambar 2.11 dijelaskan bahwa daerah operasi maksimal *PV* terdiri dari 3 daerah tergantung pada garis beban yaitu garis beban R1,

R2, dan R3. Perubahan nilai beban mengakibatkan garis beban berubah. Dalam hal ini secara tidak langsung, MPPT menjadi beban bagi PV system yang berfungsi mengatur garis beban agar PV beroperasi pada daerah maksimal [11].

2.4 Firefly Algorithm (Algoritma Kunang-Kunang)

Firefly algorithm merupakan *meta-heuristic algorithm* yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang. Kunang-kunang memiliki kemampuan untuk mengeluarkan cahaya yang berkedip. Cahaya diproduksi melalui proses *bioluminescence* yang seperti sinyal dalam sistem. Fungsi utama dari kedipan cahaya adalah untuk menarik pasangan dan berkomunikasi. Selain itu, cahaya ini juga berfungsi sebagai mekanisme pertahanan diri. Karakteristik *Firefly Algorithm* mengikuti 3 aturan sebagai berikut [10].

- a. Semua kunang-kunang unisex, artinya semua kunang-kunang saling tertarik satu sama lain tanpa memperdulikan jenis kelamin
- b. Tingkat ketertarikan tergantung pada kecerahan cahaya. Kunang-kunang yang memiliki tingkat kecerahan lebih tinggi akan menarik kunang-kunang yang memiliki tingkat kecerahan lebih rendah. Kecerdahan berbanding terbalik dengan jarak. Semakin dekat semakin cerah, semakin jauh semakin redup. Jika tidak ada satupun kunang-kunang yang lebih cerah, maka semua kunang-kunang bergerak random.
- c. Fungsi kecerahan dari kunang-kunang dipengaruhi oleh fungsi dari system yang akan dioptimasi

Firefly algorithm memiliki hal yang paling utama yaitu variasi kecerahan intensitas cahaya dan formulasi dari *attractiveness* (daya tarik). *Attractiveness* dipengaruhi oleh tingkat kecerahan yang berkaitan dengan fungsi dari sistem yang akan dioptimasi. Berikut ini dijelaskan beberapa bagian penting dalam *firefly algorithm* [15].

2.4.1 Attractiveness (Daya Tarik)

Formulasi *attractiveness* dipengaruhi oleh jarak antara dua kunang-kunang seperti dijelaskan pada persamaan berikut ini

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m} \quad m \geq 1 \quad (2.15)$$

r adalah jarak antara dua kunang-kunang β_0 adalah *attractiveness* pada $r = 0$ dan γ adalah koefisien penyerapan cahaya.

2.4.2 Distance (Jarak)

Jarak menentukan tingkat kecerahan cahaya. Jarak antara dua kunang-kunang i dan j adalah X_i dan X_j mempunyai hubungan persamaan berikut ini.

$$r_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (X_{i,k} - X_{j,k})^2} \quad (2.16)$$

$X_{i,k}$ adalah komponen dari koordinat X_i dari *firefly* ke i , dan d adalah jumlah dimensi.

2.4.3 Movement (Pergerakan Kunang-Kunang)

Arah pergerakan kunang-kunang selalu mengikuti kunang-kunang yang memiliki tingkat kecerahan lebih tinggi. Kunang-kunang i tertarik pada kunang-kunang j yang dirumuskan dalam persamaan berikut ini.

$$X_i = X_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (X_j - X_i) + \alpha(rand - 0.5) \quad (2.17)$$

rand adalah angka random yang nilainya berkisar antara nilai $[0, 1]$.

Pada implementasinya ditentukan $\beta_0 = 1$ dan $\alpha \in [0, 1]$.

Berdasarkan pada peraturan di atas, langkah dasar *firefly algorithm* yang digunakan untuk proses optimisasi sistem adalah sebagai berikut.

Fungsi objektif $f(X)$, $X = (X_1, \dots, X_d)^T$;

Inisialisasi populasi kunang-kunang X_i ($i = 1, 2, \dots, n$)

Menentukan intensitas cahaya I_i pada X_i dengan $f(X_i)$;

Menentukan koefisien penyerapan cahaya γ

while ($t < \text{Max Generation}$)

 for $i = 1 : n$ (semua n kunang-kunang)

 for $j = 1 : i$ (intensitas cahaya I_i pada X_i ditentukan oleh $f(X_i)$)

 If ($I_j > I_i$)

 Kunang-kunang i berpindah ke f dalam dimensi d

 end if

 Variasi daya Tarik dengan jarak r pada $\exp[-\gamma r]$

 Evaluasi solusi baru dan perbarui intensitas cahaya

 end for j

end for i

Posisi kunang-kuang diurutkan dan mencari posisi terbaik baru

end while

Tampilkan hasil

2.5 MPPT Menggunakan *Firefly Algorithm*

MPPT merupakan metode untuk menentukan daerah operasi maksimum pada PV. Nilai tegangan dan nilai arus dibandingkan kemudian dioptimisasi supaya diperoleh daya maksimum pada kondisi beban tertentu. *Firefly algorithm* berfungsi untuk menentukan daerah operasi maksimal PV pada berbagai variasi intensitas cahaya matahari.

Nilai beban yang berubah-ubah juga menyebabkan nilai *Maximum Power Point* juga berubah. Perubahan ini menyebabkan, pergeseran letak garis beban. Garis beban inilah yang menjadi acuan untuk menentukan daerah operasi maksimal sehingga menghasilkan daya keluran yang maksimal juga. Pencarian daerah operasi maksimal ini, dilakukan oleh *firefly algorithm*. Pergeseran garis beban akan mempengaruhi perubahan letak daerah operasi maksimal, sehingga dapat dikatakan bahwa secara tidak langsung *boost converter* berfungsi sebagai beban [11].

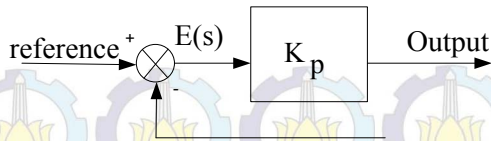
2.6 Kontroler PID

Pada sistem yang berjalan, *error* dapat terjadi. Terjadinya eror ini akan mempengaruhi kinerja sistem. Penambahan kontroler perlu dilakukan untuk membuat sistem kembali stabil. Kontroler berfungsi untuk mereduksi eror antara sinyal *setting* dan sinyal aktual. Sistem yang efektif akan mampu bereaksi dengan cepat dengan sinyal aktual yang dihasilkan [1].

2.6.1 Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional memiliki keluaran berupa hasil kali antara gain proporsional dengan sinyal input. Keluaran kontrol proporsional Sinyal input yang berubah akan mempengaruhi perubahan konstanta pengali. langsung mengubah keluaran sebesar konstanta pengali.

Gambar 2.12 menunjukkan blok diagram pada kontroler proporsional. Sinyal *error* merupakan selisih antara sinyal setting dengan sinyal aktual.



Gambar 2.12 Blok diagram sinyal kontroler proporsional

Kontroler proporsional mempunyai konstanta K_p . Penggunaan konstanta K_p ini mengikuti ketentuan sebagai berikut.

1. Jika nilai K_p kecil maka kontroler proporsional melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan mengakibatkan respon sistem yang lambat.
2. Kalau nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan stabil.
3. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi.

2.6.2 Kontroler Integral

Kontroler integral mempunyai fungsi untuk menghasilkan kesalahan bernilai nol pada keadaan *steady state*. Keluaran kontroler integral sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Berikut ini adalah karakteristik dari kontroler integral.

1. Kontroler integral memperlambat respon karena membutuhkan waktu tertentu untuk menghasilkan keluaran
2. Ketika sinyal *error* berharga nol, maka keluaran akan tetap pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal *error* tidak berharga nol, maka nilai keluaran tergantung nilai besarnya sinyal *error* dan nilai K_i .
4. K_i (konstanta integral) yang berakibat meningkatnya sinyal osilasi dan mempercepat hilangnya *offset*.

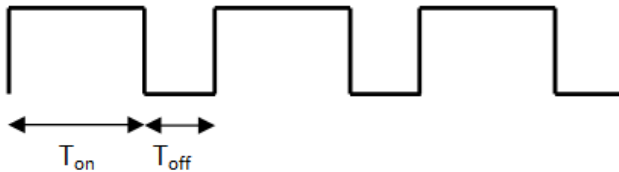
2.6.3 Kontroler Diferensial

Pada umumnya kontroler diferensial berfungsi untuk mempercepat respon awal suatu sistem, namun tidak memperkecil nilai *error* [9]. Kontroler diferensial tidak pernah digunakan pada lingkup yang sempit karena hanya berkerja efektif pada sistem yang kecil. Kontroler diferensial memiliki faktor konstanta differensial T_d . Berikut adalah karakteristik kontroler diferensial.

1. Kontroler diferensial tidak bisa menghasilkan keluaran jika tidak ada perubahan sinyal *error*
2. Jika sinyal *error* berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.

2.7 Pulse Wave Modulation (PWM)

PWM merupakan metode untuk mengatur lebar pulsa yang digunakan pada sistem kontrol pada *boost converter*. *PWM* bekerja dengan bantuan gelombang kotak yang dapat diubah-ubah siklus kerjanya (*Duty Cycle*) untuk menghasilkan tegangan yang bervariasi [6].



Gambar 2.13 Modulasi sinyal PWM pada *boost converter*

Pada Gambar 2.13 dapat dijelaskan bahwa T_{on} merupakan waktu di mana tegangan keluaran bernilai tinggi dan T_{off} merupakan waktu di mana tegangan keluaran rendah. Sedangkan T adalah periode gelombang yang merupakan penjumlahan antara T_{on} dan T_{off} . Siklus kerja (*Duty Cycle*) diperoleh dari :

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.18)$$

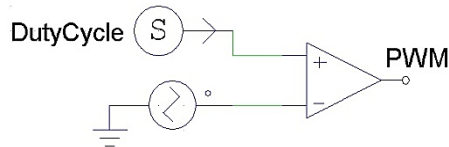
Tegangan yang keluar dapat bervariasi sehingga didapatkan,

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (2.19)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T} \times V_{in} \quad (2.20)$$

Sehingga nilai tegangan *output* didapatkan dengan mengubah nilai T_{on} . Untuk mendapatkan sinyal PMW dari sinyal input berupa sinyal analog

dapat dilakukan dengan membentuk gelombang gigi gergaji atau sinyal segitiga yang diteruskan ke *comparator* bersama sinyal aslinya.



Gambar 2.14 Membangkitkan sinyal PWM dengan sinyal gigi gergaji

Pada Gambar 2.14 dijelaskan bahwa gelombang gigi gergaji atau sinyal segitiga dimasukkan ke komparator dengan input berupa *duty cycle* untuk menghasilkan sinyal PWM [8].

2.8 Mobil Surya (*Solar Car*)

Mobil surya (*solar car*) menggunakan sumber daya *PV system* sebagai penggerakannya. Spesifikasi *phovoltaic* yang digunakan pada simulasi ini sesuai dengan spesifikasi PV pada Mobil Suryawangsa. Mobil ini merupakan karya dari SMK Muhammadiyah 7 Malang dan Laboratorium PSOC Teknik Elektro ITS.



Gambar 2.15 Mobil Listrk Suryawangsa

Mobil ini memiliki roda penggerak motor DC dengan kecepatan laju antara 30-70 km/jam. Simulasi ini menggunakan spesifikasi *PV* yang sesuai pada Mobil Suryawangsa yaitu daya maksimal 100 Watt, Berikut ini adalah tabel spesifikasi *PV* untuk Mobil Suryawangsa [4].

Tabel 3.1 Spesifikasi PV Untuk Mobil Suryawangsa

Parameter	Nilai
Rating PV	100 Watt (2 buah PV @ 50 Watt)
Jenis PV	Policrystalline
Rating Bateri	24 Volt (4 buah Bateri, @ 6Volt)
Jenis Bateri	Lead Acid (<i>deep cycle</i>)

BAB 3

PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA

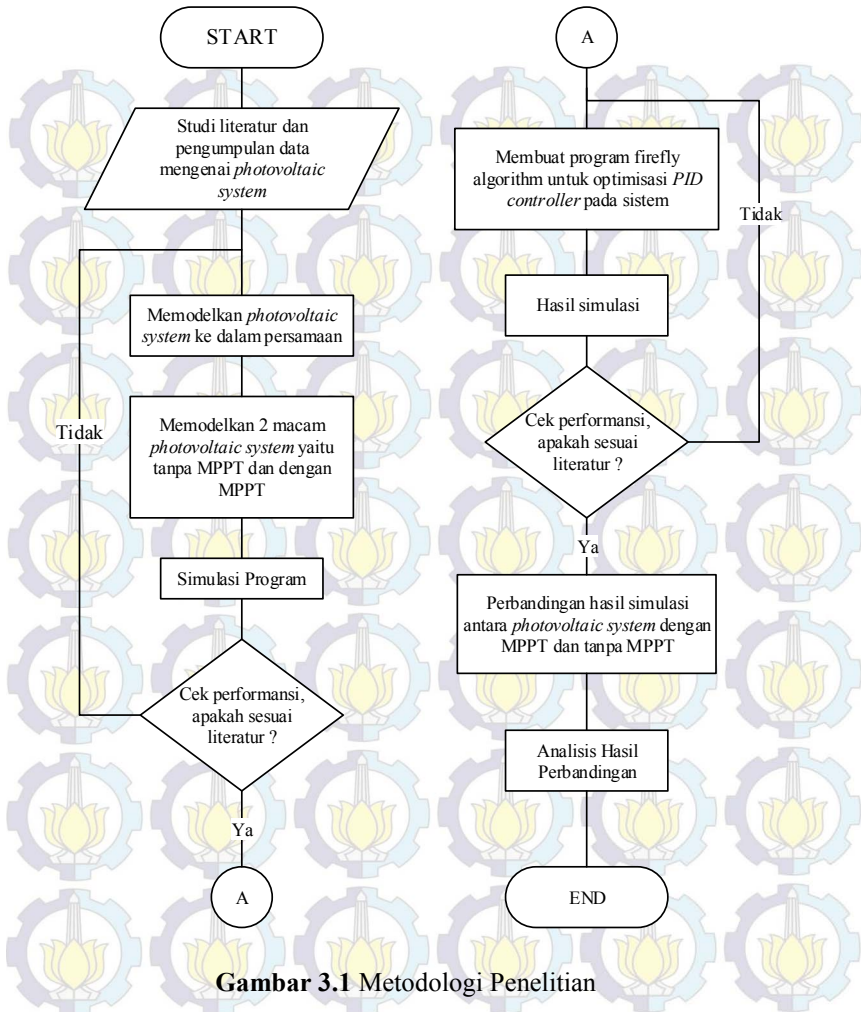
3.1 Metodologi Penelitian

Pada Tugas Akhir ini, digunakan *firefly algorithm* untuk mengoptimisasi *Maximum Power Point Tracking* pada PV system. Simulasi penelitian ini bertujuan untuk mengoptimisasi parameter-parameter MPPT pada berbagai kondisi intensitas cahaya matahari agar didapatkan daya keluaran yang maksimal sesuai dengan *set point* yang sudah ditentukan. Pada Gambar 3.1 dijelaskan bahwa penelitian ini dimulai dengan studi literature dari berbagai sumber baik buku maupun penelitian yang lain. Selanjutnya, pengumpulan data-data yang terkait dengan PV system. Data-data yang diperoleh digunakan untuk membuat permodelan PV system.

Berikutnya, mendesain *photovoltaic system*, *boost converter*, kontroler PID, dan PWM. Desain sistem dibuat dengan software PSIM yang dihubungkan dengan Matlab Simulink. PSIM dan Simulink dihubungkan dengan *SIM Coupler*. Simulink digunakan untuk menjalankan *Firefly Algorithm*. Sistem dibuat dengan dua jenis yaitu menggunakan PID controller dengan *firefly algorithm* dan tanpa menggunakan *PID controller* dengan *firefly algorithm*.

PID controller didesain di Matlab Simulink. *Firefly Algorithm* berfungsi untuk menala parameter PID agar mendapatkan nilai yang terbaik. Nilai PID yang terbaik akan menyebabkan nilai *duty cycle* yang tepat sesuai dengan kondisi intensitas cahaya matahari [12].

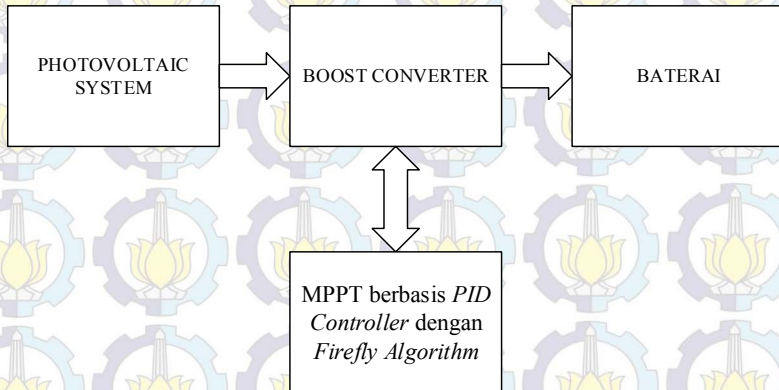
Intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah akan menyebabkan daya keluaran yang berubah-ubah. Kontroler PID berkerja berdasarkan hasil penalaan dari *firefly algorithm* untuk kemudian mengatur *duty cycle* agar didapatkan daya keluaran yang maksimal. Simulasi ini bertujuan untuk memperoleh perbandingan antara daya keluaran *photovoltaic system* tanpa optimisasi *firefly algorithm* dan dengan optimisasi *firefly algorithm* pada intensitas cahaya matahari yang berbeda-beda.



3.2 Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan

Pada bagian ini dijelaskan mengenai permodelan sistem dari setiap bagian. Selain itu juga dibahas mengenai aplikasi *firefly algorithm* untuk optimisasi *Maximum Power Point Tracking* pada *photovoltaic system*. .

Secara umum desain *Maximum Power Point Tracking* menggunakan *firefly algorithm* dijelaskan pada Gambar 3.3. Spesifikasi tegangan keluaran dan daya PV *system* mengacu pada spesifikasi tegangan baterai yang digunakan pada Mobil Suryawangsa.



Gambar 3.2 MPPT berbasis PID dengan *Firefly Algorithm*

3.2.1 Pemodelan *Photovoltaic*

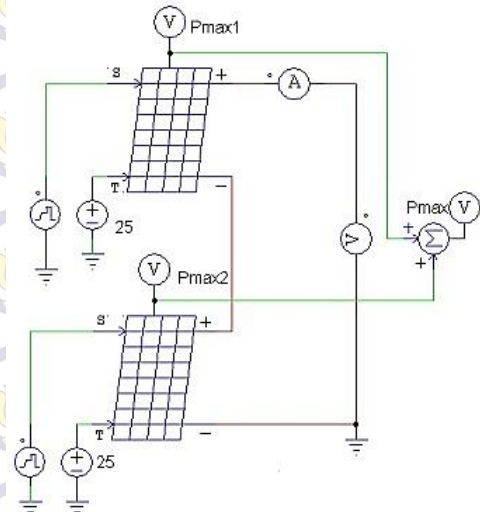
Photovoltaic system pada simulasi ini terdiri atas 2 buah modul *solar cell* dengan kapasitas masing-masing 50 W yang dipasang secara seri sehingga daya maksimal yang dihasilkan adalah 100 W. Spesifikasi *photovoltaic* yang digunakan pada simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi modul PV

Parameter	Nilai
Daya Maksimum (P_{max})	50 Watt
Tegangan Maksimum (V_{mp})	17,35 Volt
Arus Maksimum (I_{mp})	2,88 Ampere
Tegangan <i>Open circuit</i> (V_{oc})	21,88 Volt
Arus <i>Short circuit</i> (I_{sc})	3,08 Ampere
Koefisien Temperatur dari V_{oc}	-0,38% °Celsius
Koefisien Temperatur dari I_{sc}	0,04% °Celsius
Temperatur saat bekerja	-40 °C hingga 85 °C
Jumlah Cell	24 cell

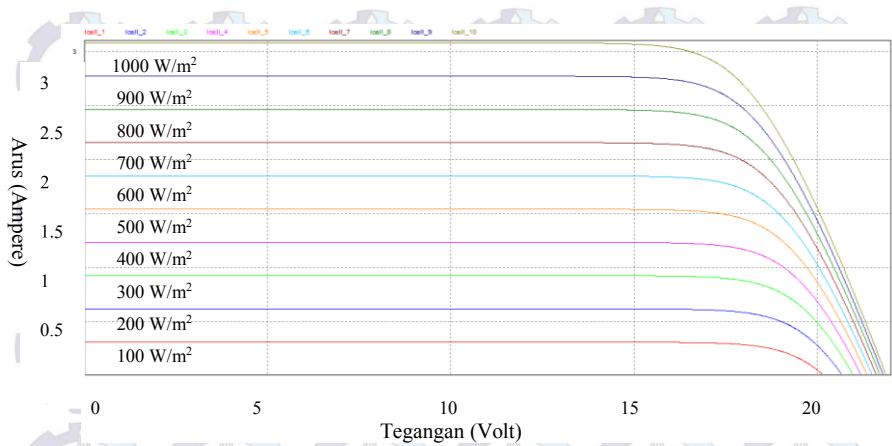
Nilai dari spesifikasi *photovoltaic* pada didapatkan dari penelitian sebelumnya[4].

Pemodelan *photovoltaic* terdiri dari 2 buah modul seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut ini.

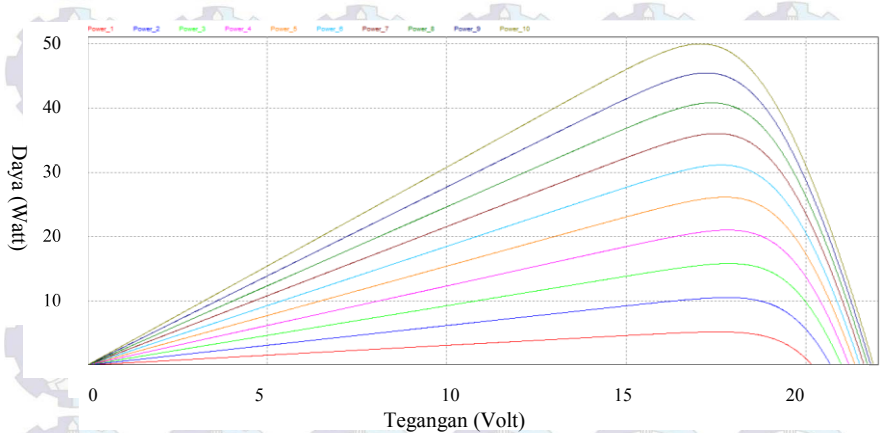


Gambar 3.3 Pemodelan *photovoltaic*

PV dimodelkan untuk mendapatkan nilai daya maksimal pada setiap *irradiance*. Nilai daya digunakan sebagai nilai referensi pada MPPT. Selain nilai daya, juga diperoleh nilai tegangan yang digunakan sebagai tegangan referensi dari *boost converter*. Kurva karakteristik *photovoltaic* pada *irradiance* 100 W/m² sampai 1000 W/m² dan temperature 25°C ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5 berikut ini.



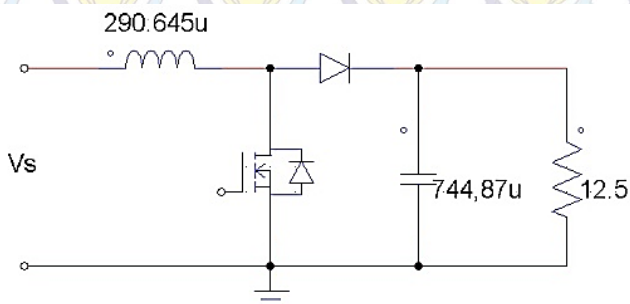
Gambar 3.4 Kurva V-I pada berbagai nilai *irradiance* dari 100 W/m² sampai 1000 W/m²



Gambar 3.5 Kurva P-V pada berbagai nilai *irradiance* dari 100 W/m² sampai 1000 W/m²

3.2.2 Pemodelan *Boost Converter*

Photovoltaic system pada simulasi ini menggunakan *boost converter* yang digunakan untuk menaikkan tegangan. Komponen utama terdiri atas MOSFET, induktor, resistor, dan kapasitor. Gambar 3.5 merupakan permodelan *boost converter*.



Gambar 3.6 Permodelan *Boost Converter*

Pada Gambar 3.6 dijelaskan bahwa pada *boost converter* terdapat nilai parameter dari arus induktor, arus kapsitor, *duty cycle* dan nilai resistor beban.

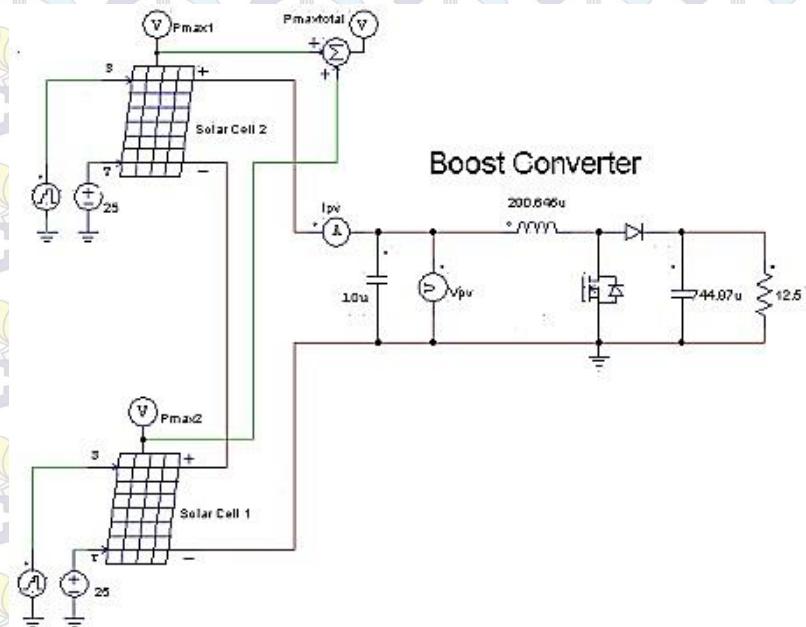
Tabel 3.2 Spesifikasi *boost converter*

Parameter	Nilai
Power maksimal PV	100 Watt
V_{in}	8-21 Volt
V_{out}	28 Volt
Frekuensi switching	35 kHz
Duty cycle	0,71429
Arus ripple maksimal	10%
Induktor konverter <i>boost</i>	290.645 μH
Kapasitor konverter <i>boost</i>	744,87 μF
Resistor beban	12,5 Ω

Semua nilai dari parameter-parameter *boost converter* di atas didapatkan dari penelitian sebelumnya [4].

3.2.3 Pemodelan *Photovoltaic System*

Pemodelan sistem menggunakan pada Tugas Akhir ini dirancang menggunakan PSIM. Gambar 3.7 berikut menunjukkan konfigurasi sistem yang terdiri dari *solar module*, *boost converter*, dan beban.



Gambar 3.7 *Photovoltaic System* menggunakan *boost converter*

Pada sistem di atas terdapat parameter-parameter yang menunjukkan masing-masing bagian dari *photovoltaic system*. Dimulai dari bagian input sistem berupa tegangan dan arus. Nilai intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah dan suhu yang konstan merupakan parameter input yang menyebabkan *photovoltaic system* menghasilkan daya keluaran [13].

Tegangan dan arus input dioptimisasi untuk menghasilkan daya maksimum dari pada *photovoltaic*. Optimisasi tegangan dan arus dilakukan oleh kontroler PID yang nilai K_p , K_i , dan K_d dihitung dengan

metode *firefly algorithm*. Hasil dari optimisasi berupa *duty cycle* yang berfungsi untuk mengatur kerja dari *boost converter*. *Boost converter* digunakan untuk mengatur nilai tegangan agar menghasilkan daya yang sesuai.

Dalam optimisasi, nilai tegangan dan daya dibandingkan untuk memperoleh perubahan arus yang bias diamati dan berfungsi sebagai sinyal feedback untuk menghasilkan keluaran daya yang maksimal sehingga *photovoltaic* dapat bekerja pada daerah maksimal.

3.2.4 Pulse Wave Modulation Untuk Boost Converter

Pulse Wave Modulation (PWM) merupakan suatu metode untuk mengatur lebar pulsa yang digunakan untuk mengatur kerja dari *boost converter*. Sinyal *duty cycle* dihubungkan ke Simulink dengan *SIM Coupler* untuk mendapatkan sinyal dari Simulink. Sinyal dari Simulink digabungkan dengan sinyal gigi gergaji (*triangle wave*) melalui komparator. PWM bekerja menghasilkan *duty cycle* yang diatur oleh *firefly algorithm* [14].

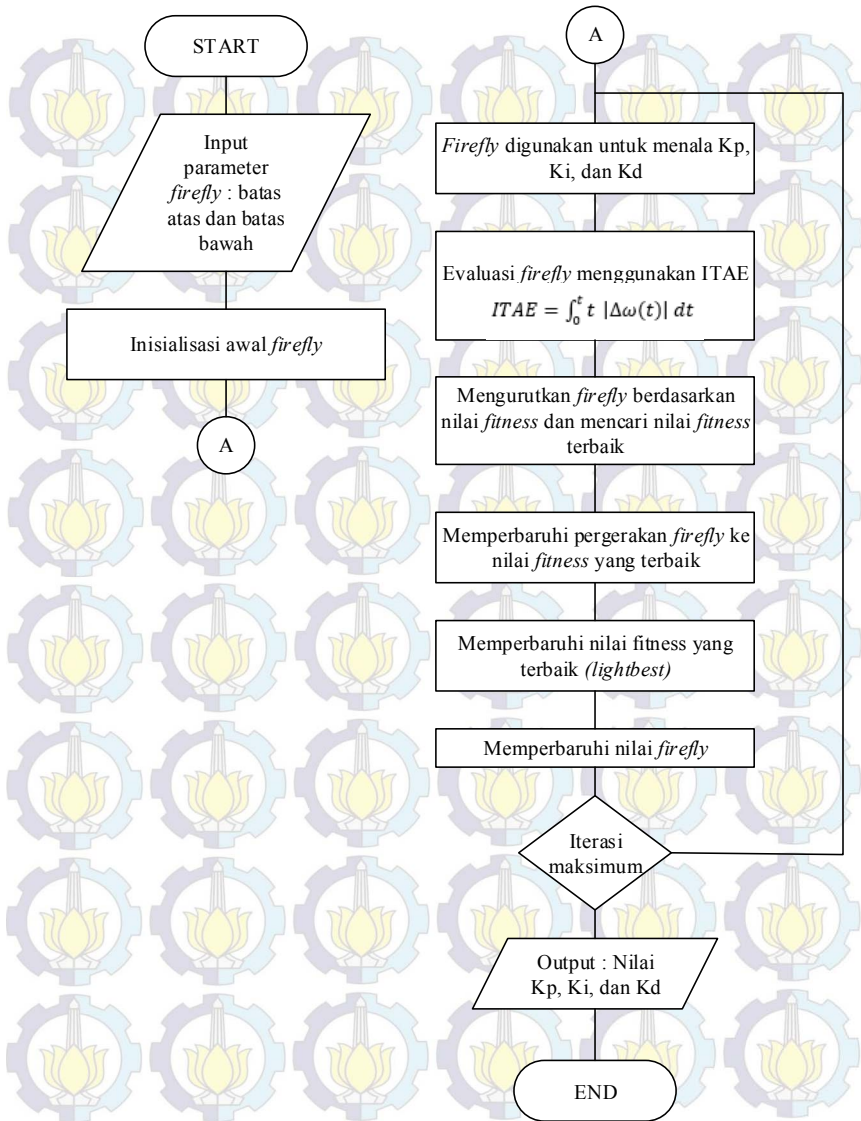
Proses penalaan oleh *firefly algorithm* terjadi di Simulink untuk menghasilkan nilai parameter K_p , K_i , K_d . *PID Controller* bekerja sesuai dengan parameter K_p , K_i , dan K_d yang dihasilkan dengan metode penalaan *firefly algorithm*. Nilai parameter dari *PID controller* ini mengatur nilai dari *duty cycle*. Nilai dari *duty cycle* antara 0,5-0,8. Nilai *duty cycle* mempengaruhi kerja dari *boost converter*. *Boost converter* inilah yang menghasilkan nilai tegangan yang bervariasi, sehingga didapatkan daya yang maksimal pada *photovoltaic system* [9].

3.3 Metode Firefly Algorithm

Metode yang digunakan untuk optimisasi *Maximum Power Point Tracking* ini adalah *firefly algorithm*. Metode ini digunakan untuk menala parameter PID yang digunakan untuk memperoleh daya maksimal pada *photovoltaic system*. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah dengan menggunakan *Integral Time Absolute Error* (ITAE).

$$ITAE = \int_0^t t |\Delta\omega(t)| dt \quad (3.1)$$

Parameter yang ditala oleh *firefly algorithm* adalah K_p , K_i , dan K_d . Diagram alur proses penalaan parameter oleh *firefly algorithm* ditunjukkan oleh *flowchart* pada Gambar 3.8.

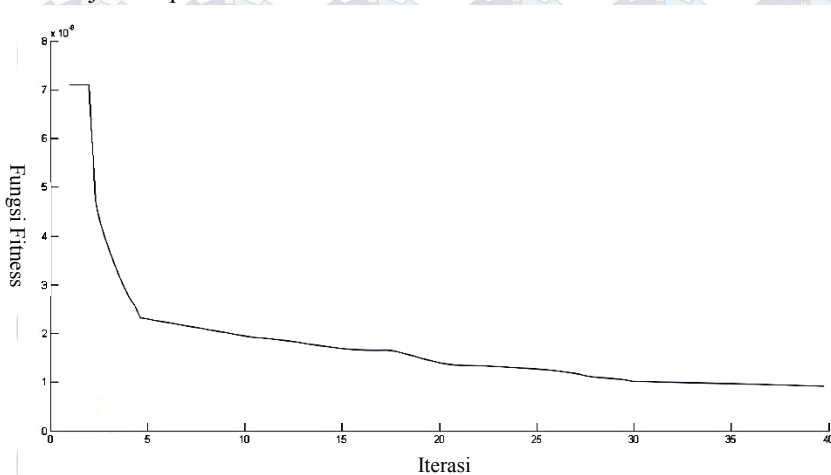


Gambar 3.8 Diagram alur metode *firefly algorithm*

Tabel 3.3 Parameter *Firefly Algorithm*

Parameter FA	Nilai
<i>Alpha</i>	0,25
<i>Beta</i>	0,2
<i>Gamma</i>	1
<i>Dimensi</i>	3
<i>Jumlah Kunang-Kunang</i>	50
<i>Iterasi Maksimum</i>	40

Sistem disimulasikan pada berbagai nilai beban untuk mengetahui pengaruh metode *firefly algorithm* pada daya keluaran yang dihasilkan. Beban yang dipakai adalah resistor 12,5 Ω , 15 Ω , 17,5 Ω , dan 20 Ω . Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 12,5 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.9.



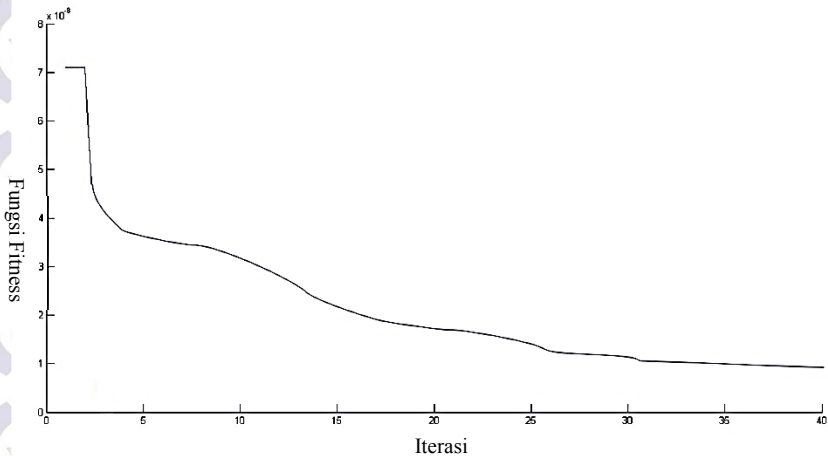
Gambar 3.9 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 12.5 Ω

Pada Gambar 3.10 dapat ditunjukkan bahwa *firefly algorithm* konvergen pada iterasi ke 33 dan didapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter *PID Controller* pada beban 12,5 Ω

Parameter	Nilai
K_p	2,75
K_i	1,0
K_d	0,01

Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 15 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.10.



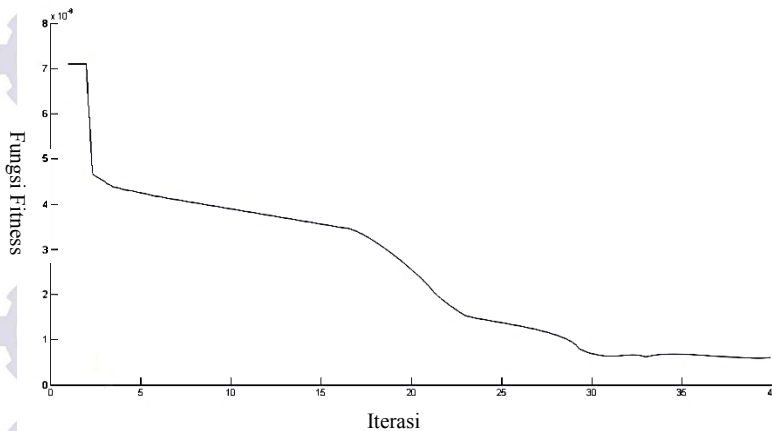
Gambar 3.10 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 15 Ω

Pada Gambar 3.11 dapat dijelaskan bahwa *firefly algorithm* konvergen pada iterasi ke 34 dan didapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Parameter *PID Controller* pada beban 15 Ω

Parameter	Nilai
Kp	2.95
Ki	1,02
Kd	0.05

Untuk grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 17,5 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.11.



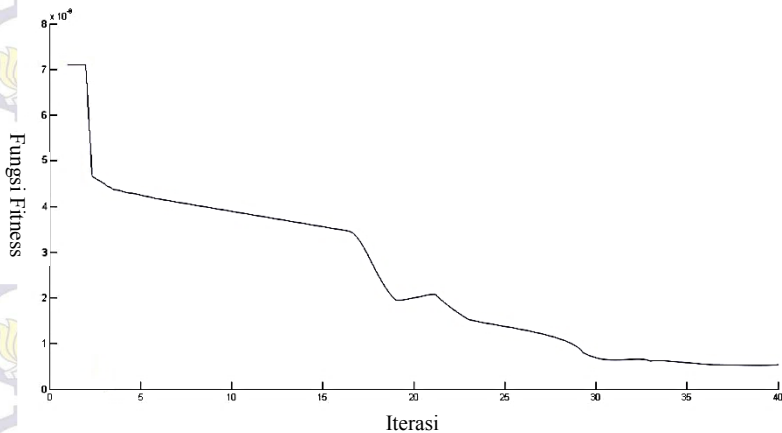
Gambar 3.11 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 17,5 Ω

Pada Gambar 3.11 dapat dijelaskan bahwa *firefly algorithm* mengalami konvergensi pada iterasi ke 33 dan didapatkan nilai parameter Kp, Ki, dan Kd seperti yang ditunjukkan Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Parameter *PID Controller* pada beban 17.5 Ω

Parameter	Nilai
Kp	3.01
Ki	1,01
Kd	0.03

Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 20 Ω ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Grafik konvergensi *firefly algorithm* pada beban 20 Ω

Pada Gambar 3.12 dijelaskan bahwa *firefly algorithm* mengalami konvergensi pada 31 dan didapatkan nilai parameter Kp, Ki, dan Kd seperti yang ditunjukkan Tabel 3.5.

Tabel 3.7 Parameter *PID Controller* pada beban 20 Ω

Parameter	Nilai
Kp	2.91
Ki	1,02
Kd	0.02

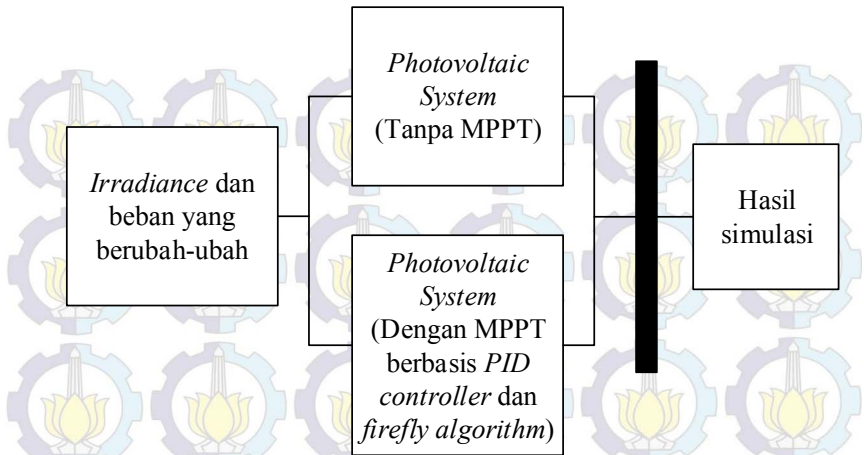
Nilai K_p , K_i , dan K_d merupakan nilai hasil perhitungan menggunakan *firefly algorithm* yang digunakan untuk optimisasi *boost converter*. Bagian *boost converter* yang dioptimisasi adalah nilai *duty cycle*.

3.4 Simulasi Sistem

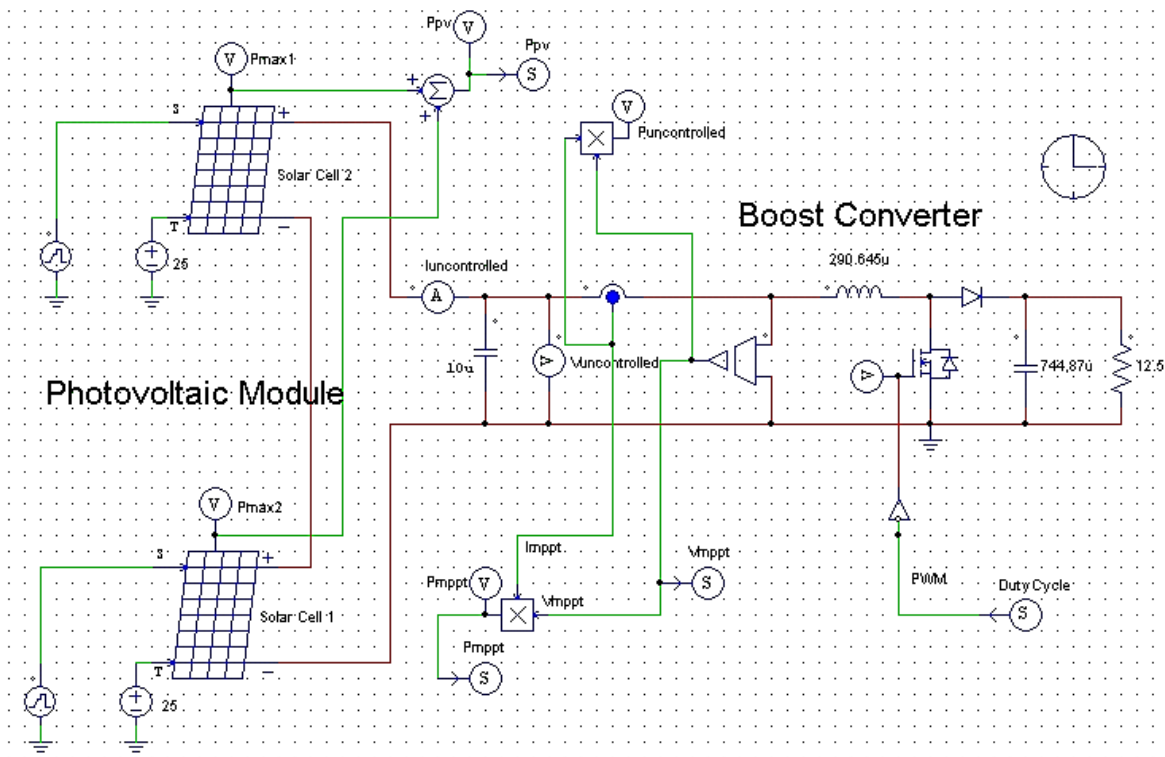
Simulasi bertujuan untuk membandingkan hasil antara *Maximum Power Point Tracking* menggunakan parameter *PID controller* dengan *firefly algorithm* dan *Maximum Power Point Tracking* menggunakan kontroler pada kondisi intensitas cahaya matahari yang berbeda-beda. Perbandingan ini untuk menunjukkan penggunaan sistem control untuk mengatur agar *photovoltaic system* bekerja pada daerah maksimal sehingga menghasilkan daya yang maksimal [16].

Pada simulasi yang dijalankan tanpa sistem kontrol ini, nilai dari *duty cycle* berubah-ubah tanpa dikontrol dan perubahannya tidak teratur karena nilai intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah juga. Nilai *duty cycle* yang dihasilkan tidak dikontrol sehingga nilainya tidak optimal dan *photovoltaic system* tidak bekerja pada daerah maksimal. Sedangkan dengan tambahan *PID controller*, tegangan dan arus dari *photovoltaic* masuk ke *PID controller* dan dioptimisasi untuk menghasilkan daya keluaran yang mendekati daya keluaran *photovoltaic* yang maksimal.

Nilai intensitas cahaya matahari (*irradiance*) yang berubah-ubah ini menyebabkan daya maksimal *photovoltaic* yang dihasilkan juga berubah-ubah dengan nilai dibawah daya maksimal (*set point*). Dalam hal ini, *firefly algorithm* berfungsi melakukan penalaan untuk menemukan nilai parameter yang optimal dari *PID controller*. Parameter *PID controller* yang optimal diperoleh jika nilai daya keluaran dapat mendekati nilai daya maksimal (*set point*) pada berbagai nilai intensitas cahaya matahari. Gambar 3.13 menunjukkan perbandingan MPPT berbasis *PID controller* dengan *firefly algorithm* dan



Gambar 3.13 Blok diagram perbandingan MPPT



Gambar 3.14 Pemodelan MPPT berbasis *PID controller* dengan *firefly algorithm*

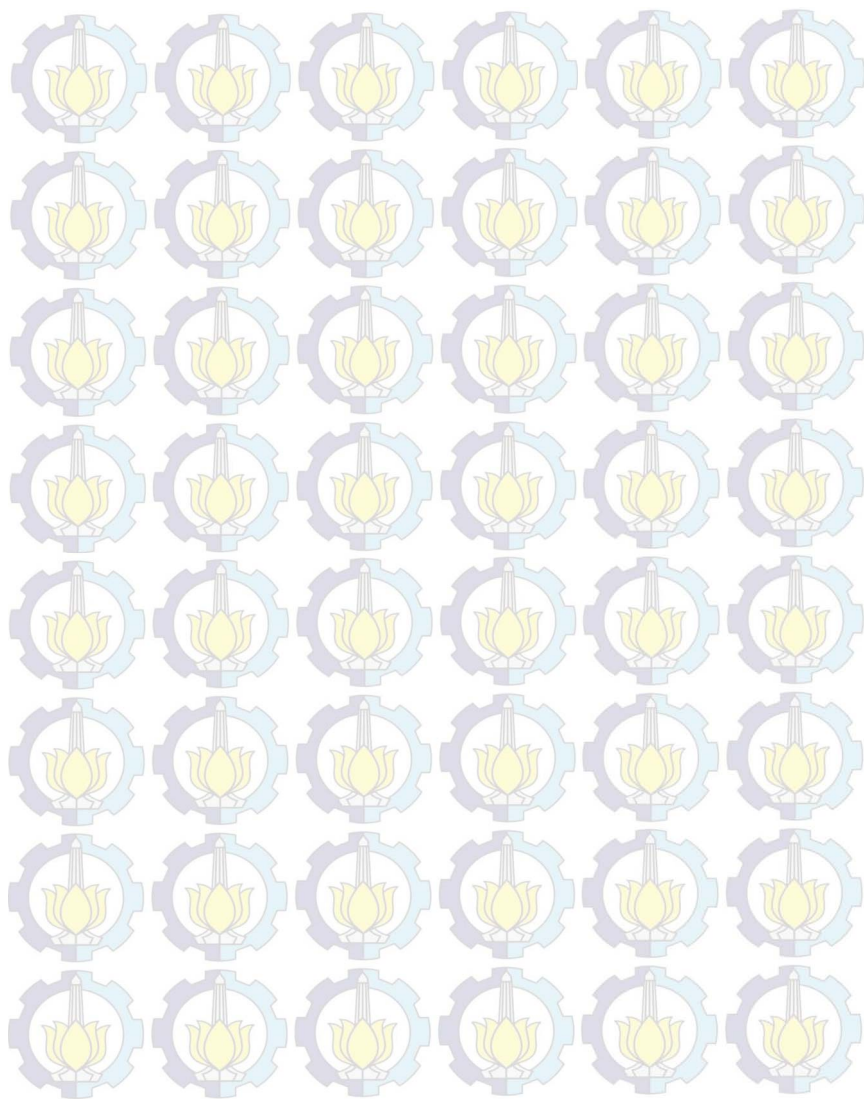
memiliki daya 50 Watt dipasang seri sehingga dapat menghasilkan daya keluaran maksimal hingga 100 Watt. Tegangan dan arus yang keluar masuk ke *boost converter*. *Boost converter* berfungsi untuk menaikkan tegangan berdasarkan pada *duty cycle*.

Tegangan dan arus yang masuk akan dioptimisasi oleh *PID controller* yang nilai parameternya dihitung dan dioptimisasi menggunakan *firefly algorithm*. Hasil optimisasi oleh *firefly algorithm* ini menghasilkan nilai K_p , K_i , dan K_d yang digunakan untuk mengatur kinerja *Pulse Wave Modulation*. PWM digunakan untuk menghasilkan sinyal *duty cycle* yang digunakan untuk mengatur kinerja *boost converter*.

Tegangan dan arus dari *photovoltaic module* masuk ke *boost converter* kemudian masuk ke blok MPPT kemudian dioptimisasi nilai tegangannya untuk menghasilkan nilai *duty cycle*. Nilai tegangan dan arus dikalikan menghasilkan nilai daya. Nilai daya yang dihasilkan dibandingkan dengan nilai daya maksimal (*set point*). Jika nilai eror masih besar, maka proses diulangi sampai secara terus menerus sampai menghasilkan nilai *error* terkecil. Nilai *error* semakin kecil artinya, *photovoltaic* dapat bekerja pada daerah maksimal. Optimisasi dilakukan pada nilai tegangan yang diubah-ubah dengan mengubah-ubah nilai *duty cycle*.

Nilai *duty cycle* mempengaruhi nilai tegangan keluaran. Perubahan nilai tegangan menyebabkan perubahan nilai daya keluaran. Dalam hal ini *duty cycle* berfungsi untuk mengatur nilai tegangan sehingga *photovoltaic* dapat menghasilkan daya keluaran yang maksimal. Kinerja sistem secara keseluruhan diatur oleh *PID controller* yang nilai parameter K_p , K_i , dan K_d dioptimisasi dengan metode *firefly algorithm*.

Nilai daya sebelum masuk ke *boost converter* dibandingkan dengan nilai daya setelah masuk pada *boost converter* untuk mengetahui pengaruh *firefly algorithm* dalam proses optimisasi sistem pada berbagai kondisi intensitas cahaya matahari. Untuk pembahasan hasil simulasi *photovoltaic system* dan juga optimisasi parameter K_p , K_i , dan K_d , terdapat pada bab 4.



BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

PV yang digunakan pada simulasi ini adalah *photovoltaic system* yang menggunakan *boost converter*. Metode optimisasi yang digunakan adalah *firefly algorithm*. PV dikontrol oleh *PID controller*. *Firefly algorithm* digunakan untuk menala parameter K_p , K_i , dan K_d . Daya maksimal *photovoltaic* ditentukan sebagai daya referensi (*set point*). *PID controller* digunakan untuk mengatur *duty cycle* pada *boost converter*. *PID controller* bekerja berdasarkan pada nilai hasil penalaan dari *firefly algorithm*. Analisis dilakukan untuk mengetahui perbandingan pengaruh *firefly algorithm* pada daya keluaran yang dihasilkan pada berbagai kondisi intensitas cahaya matahari. Simulasi Tugas Akhir ini dijalankan pada software PSIM dan Matlab Simulink yang diintegrasikan dengan *SIM Coupler*. Program dijalankan pada *Notebook* dengan spesifikasi sebagai berikut.

Processor	:Intel® Core™ i5-2450M @2.50 GHz
Memory	:4 GB RAM
Operating System	:Windows 8.1 Pro
Software	:Matlab Simulink 2010a dan PSIM 9

PV disimulasikan pada berbagai kondisi dan intensitas cahaya matahari dengan suhu konstan 25°C dan *irradiance* yang berubah-ubah. Berikut ini adalah data kondisi pengujian PV.

Tabel 4.1 Data karakteristik daya PV

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	Daya Maksimal PV (Watt)
100	10,3
200	21,1
300	31,8
400	42,1
500	52,2
600	62,2
700	72,2
800	81,7
900	90,8
1000	99,9

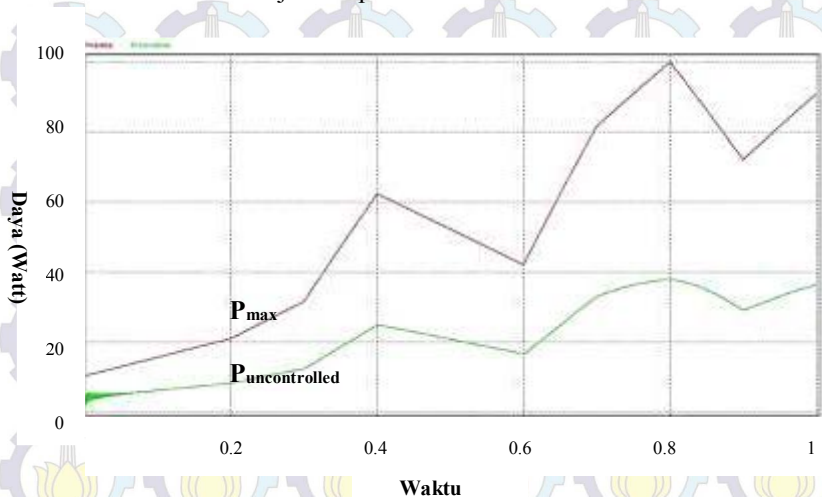
Beban yang digunakan pada PV adalah beban resistor yang berbeda-beda yaitu $12,5\ \Omega$, $15\ \Omega$, $17,5\ \Omega$, dan $20\ \Omega$. Nilai beban yang diubah-ubah bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan beban pada nilai daya keluaran pada PV yang menggunakan MPPT. Data yang akan dianalisis pada simulasi ini adalah nilai daya *photovoltaic system* tanpa MPPT dan *photovoltaic system* menggunakan MPPT untuk mengetahui pengaruh dari penalaan dengan metode *firefly algorithm* terhadap kerja *boost converter*.

4.1 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban $12,5\ \Omega$

Pada bagian ini PV bekerja pada beban $12,5\ \Omega$. Untuk mengetahui daya keluaran yang dihasilkan, simulasi dilakukan pada kondisi suhu konstan 25°C dengan *irradiance* yang berubah-ubah. PV dibandingkan pada saat kondisi tanpa menggunakan MPPT dan dengan menggunakan MPPT. Hasil simulasi dan perbandingan dijelaskan pada bagian sub-bab di bawah ini.

4.1.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Simulasi dijalankan tanpa menggunakan MPPT yang terpasang pada PV. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$ dan P_{max} pada beban $12,5\ \Omega$

Gambar 4.1 menunjukkan daya keluaran dari PV yang tidak dilengkapi dengan MPPT. Dari grafik tersebut didapatkan nilai daya dan *error* daya sebagai berikut.

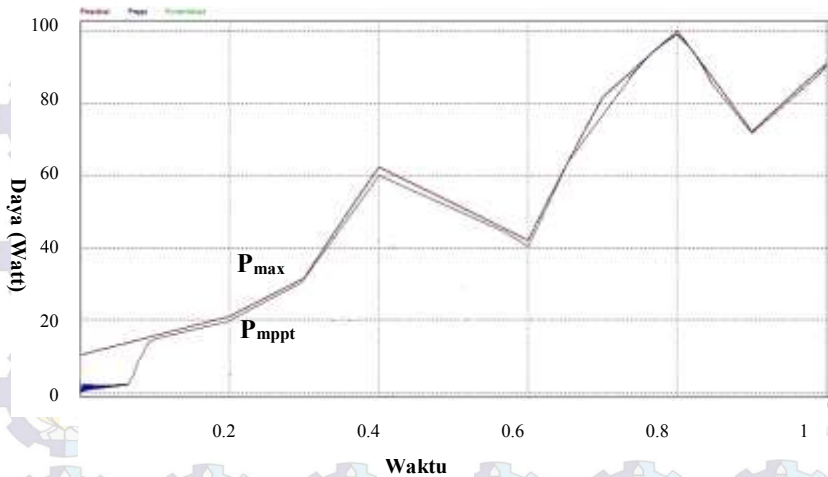
Tabel 4.2 Data *error* daya PV tanpa MPPT pada beban 12,5 Ω

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	$P_{uncontrolled}$ (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{uncontrolled}$)
100	9,8	10,3	0,5
200	11,1	20,9	9,8
300	13,7	31,8	18,1
600	29,7	62,2	32,5
500	22,1	52,2	30,1
400	18,2	42,1	23,9
800	36,2	81,7	45,5
1000	38,9	99,9	61
700	31,9	72,2	40,3
900	37,2	90,8	53,6

Pada Tabel 4.2 menunjukkan selisih perbedaan antara daya maksimal dan daya tanpa menggunakan MPPT. Dari data dapat dijelaskan bahwa terdapat perbedaan selisih yang cukup besar dikarenakan daya keluaran *photovoltaic* tidak dikontrol sehingga *photovoltaic* tidak dapat bekerja pada daerah maksimal.

4.1.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Simulasi berikutnya adalah simulasi perbandingan antara daya menggunakan MPPT untuk mengetahui pengaruhnya terhadap daya keluaran pada beban 12.5 Ω .



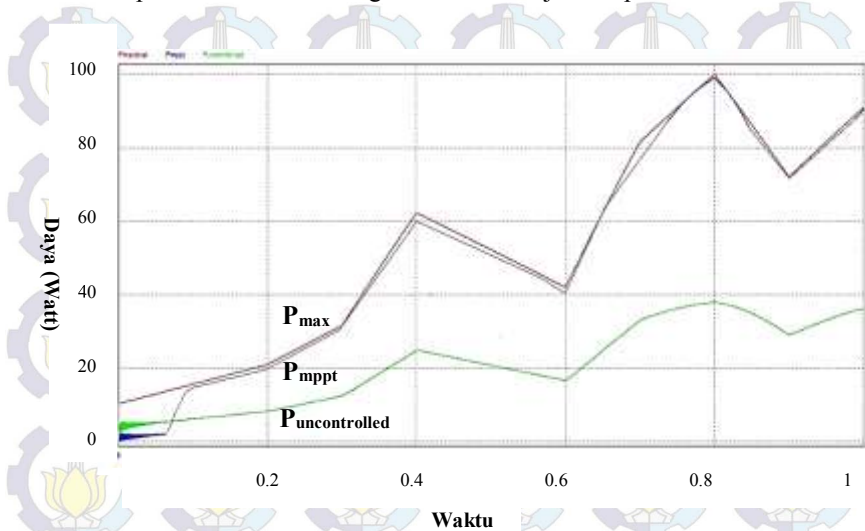
Gambar 4.2 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban $12,5 \Omega$

Data *error* daya antara PV dengan MPPT ditunjukkan pada Tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban $12,5 \Omega$

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{mppt}$)
100	9,3	10,3	1
200	18,2	20,9	2,7
300	30,2	31,8	1,6
600	61,1	62,2	1,1
500	50,2	52,2	2
400	40,9	42,1	1,2
800	80,1	81,7	1,6
1000	98,2	99,9	1,7
700	70,9	72,2	1,3
900	89,1	90,8	1,7

Hasil simulasi untuk mengetahui perbandingan daya keluaran pada PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 12,5 Ω

Dari Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa daya keluaran PV dengan menggunakan MPPT, nilainya dapat mengikuti daya maksimal sehingga dapat dijelaskan bahwa *photovoltaic* dapat bekerja pada daerah maksimal. Error daya yang didapatkan pada *irradiance* 300 Watt/m² adalah 1,6 Watt dan 1,7 Watt pada *irradiance* 900 Watt/m². Grafik perbandingan error daya PV yang tanpa menggunakan MPPT dan menggunakan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut ini.



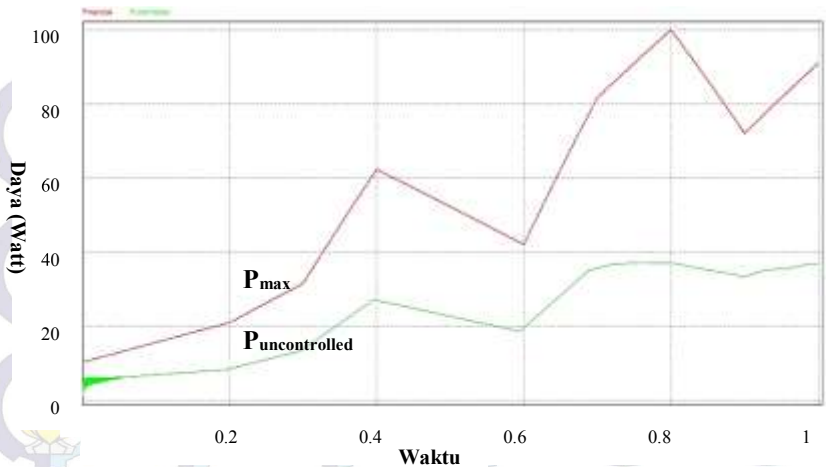
Gambar 4.4 Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban $12,5 \Omega$

4.2 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Beban 15Ω

Pada bagian ini PV bekerja pada beban 15Ω . Untuk mengetahui daya keluaran yang dihasilkan, simulasi dilakukan pada kondisi suhu konstan 25°C dengan *irradiance* yang berubah-ubah. PV dibandingkan pada saat kondisi tanpa menggunakan MPPT dan dengan menggunakan MPPT. Hasil simulasi dan perbandingan dijelaskan pada bagian di bawah ini.

4.2.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Simulasi dijalankan tanpa menggunakan MPPT yang terpasang pada PV. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik perbandingan $P_{\text{uncontrolled}}$ dan P_{\max} pada beban 15Ω

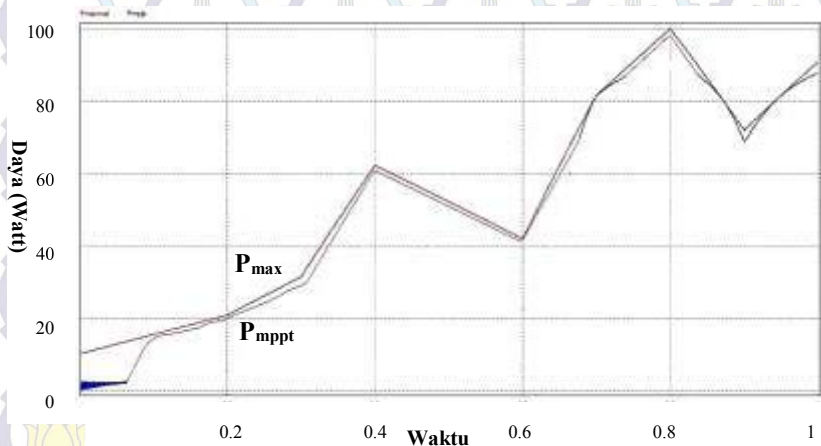
Dari Gambar 4.5 dapat dijelaskan bahwa daya keluaran PV tanpa MPPT tidak dapat mengikuti nilai daya keluaran maksimal. Data *error* daya PV tanpa MPPT ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Data *error* daya PV tanpa MPPT pada beban 15Ω

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	$P_{\text{uncontrolled}}$ (Watt)	P_{\max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{\max} - P_{\text{uncontrolled}}$)
100	9,7	10,3	0,60
200	10,9	20,9	10,00
300	12,5	31,8	19,30
600	29,6	62,2	32,60
500	21,6	52,2	30,60
400	17,9	42,1	24,20
800	35,3	81,7	46,40
1000	37,4	99,9	62,50
700	30,3	72,2	41,90
900	36,7	90,8	54,10

4.2.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Hasil simulasi PV yang menggunakan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.6 di bawah ini.



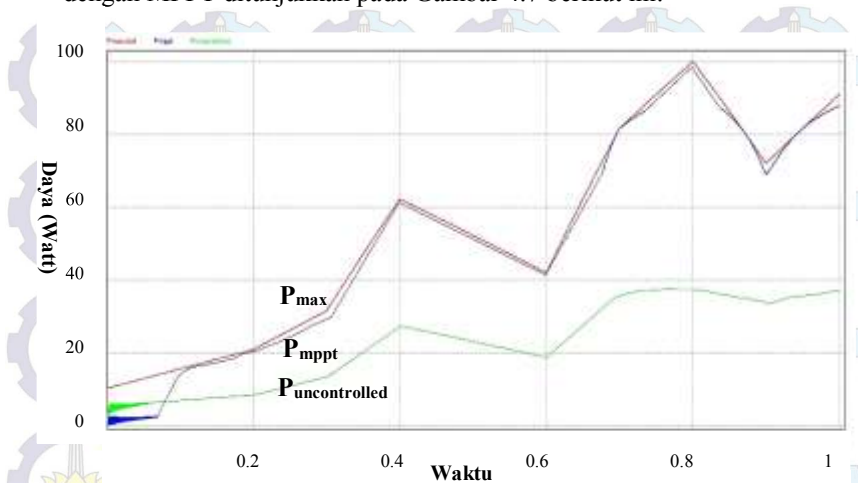
Gambar 4.6 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban 15Ω

Pada Gambar 4.6 dapat dijelaskan pada saat beban ditambah daya keluaran menjadi berkurang.

Tabel 4.5 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban 15Ω

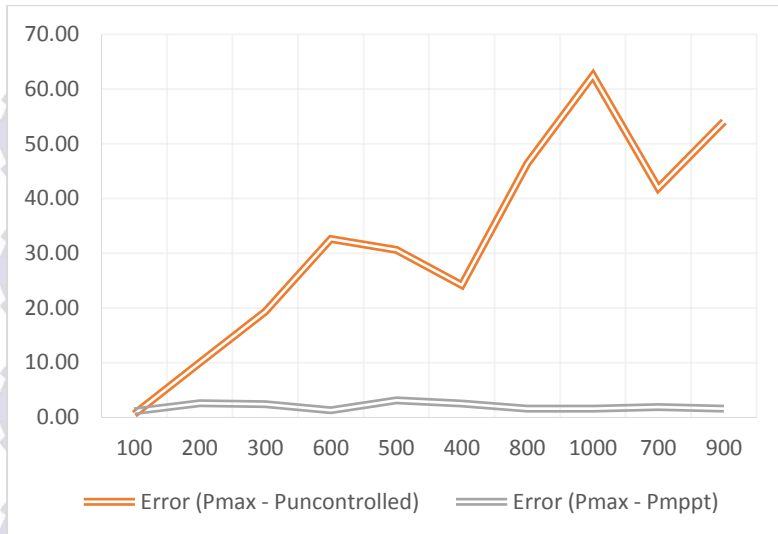
<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{mppt}$)
100	9,2	10,3	1,10
200	18,3	20,9	2,60
300	29,4	31,8	2,40
600	60,9	62,2	1,30
500	49,1	52,2	3,10
400	39,6	42,1	2,50
800	80,1	81,7	1,60
1000	98,3	99,9	1,60
700	70,3	72,2	1,90
900	89,2	90,8	1,60

Hasil simulasi untuk perbandingan antara PV dengan MPPT dan PV dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut ini.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 15Ω

Pada Gambar 4.7 dapat dijelaskan bahwa terjadi perubahan daya keluaran PV dengan MPPT dan PV tanpa MPPT dengan kondisi beban yang bertambah dari $12,5 \Omega$ menjadi 15Ω . Penambahan beban menyebabkan perubahan nilai *error* daya. Grafik perbandingan *error* daya antara PV dengan MPPT dan PV tanpa MPPT dapat ditunjukkan pada Gambar 4.8.



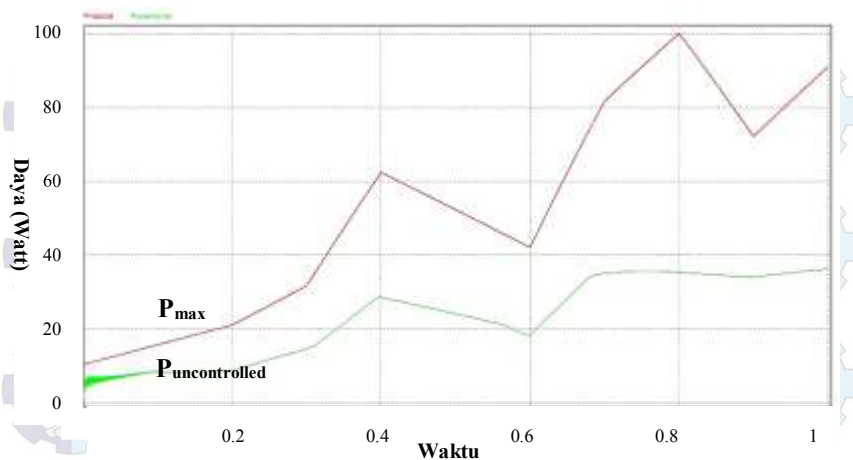
Gambar 4.8. Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 15Ω

4.3 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Saat Beban 17.5Ω

Simulasi selanjutnya dijalankan dengan menaikkan beban menjadi 17.5Ω untuk mengetahui pengaruh kenaikan beban pada daya keluaran. Hasil simulasi dan perbandingan antara PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT dijelaskan pada sub-bab berikut ini.

4.3.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Beban yang digunakan nilainya dinaikkan menjadi 17.5Ω dengan tujuan untuk mengetahui nilai perubahan daya keluaran. Hasil simulasi PV tanpa MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan $P_{\text{uncontrolled}}$ dan P_{max} pada beban 17.5Ω

Pada Gambar 4.9 dapat dijelaskan bahwa daya keluaran PV tanpa MPPT tidak dapat menyesuaikan dengan nilai daya keluaran maksimal. Data *error* daya PV ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut ini.

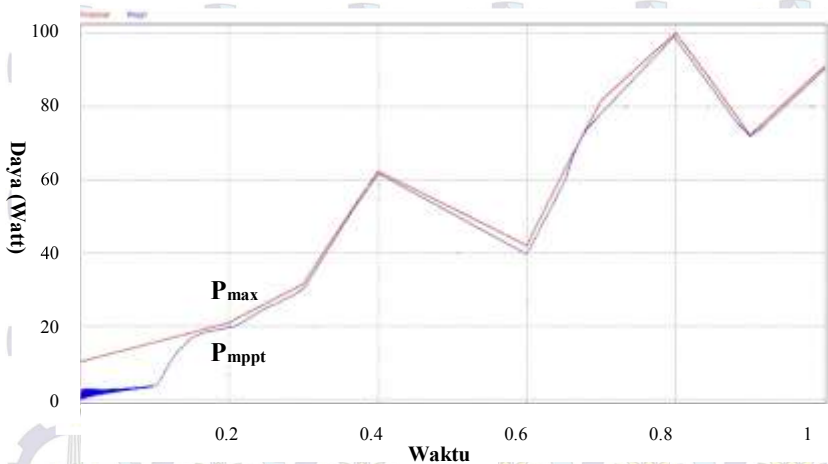
Tabel 4.6 Data *error* daya PV tanpa MPPT pada beban 17.5Ω

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	$P_{\text{uncontrolled}}$ (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{\text{max}} - P_{\text{uncontrolled}}$)
100	9,5	10,3	0,8
200	10,5	20,9	10,4
300	11,3	31,8	20,5
600	29,5	62,2	32,7
500	20,5	52,2	31,7
400	16,2	42,1	25,9
800	34,9	81,7	46,8
1000	36,3	99,9	63,6
700	29,5	72,2	42,7
900	35.7	90.8	55.1

Pada Tabel 4.6 dapat dijelaskan bahwa dengan bertambahnya beban, PV mengalami penurunan nilai *error* daya.

4.3.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Hasil simulasi PV dengan menggunakan MPPT yang dilakukan pada beban $17,5 \Omega$ ditunjukkan pada Gambar 4.10 berikut ini.



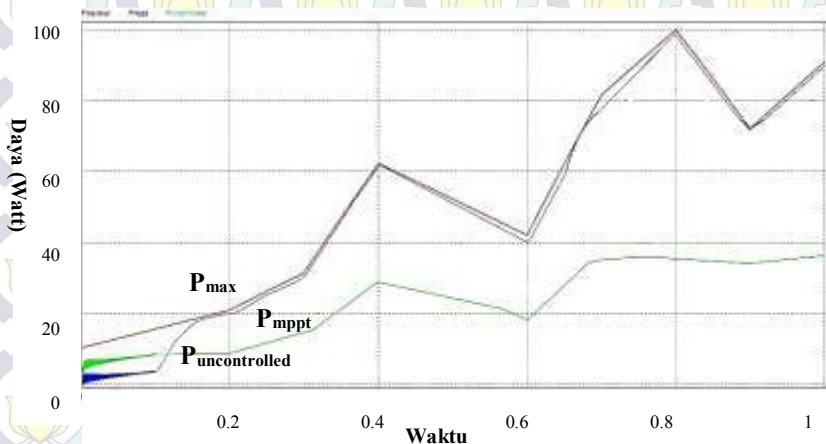
Gambar 4.10 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban $17,5 \Omega$

Pada Gambar 4.10 dapat dijelaskan bahwa daya pada *irradiance* 1000 W/m^2 mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya nilai beban. Data *error* daya PV dengan menggunakan MPPT ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban 17,5 Ω

Irradiance (Watt/m²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	Error (P_{max} - P_{mppt})
100	9,3	10,3	1
200	18,1	20,9	2,8
300	30,1	31,8	1,7
600	59,8	62,2	2,4
500	49,3	52,2	2,9
400	41,6	42,1	0,5
800	79,9	81,7	1,8
1000	98,2	99,9	1,7
700	70,5	72,2	1,7
900	88,8	90,8	2

Pada Tabel 4.7 dapat dijelaskan bahwa *error* daya PV dengan menggunakan MPPT mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya beban. Hasil simulasi perbandingan antara PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut ini.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan P_{uncontrolled}, P_{mppt}, dan P_{max} pada beban 17.5 Ω

Data perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.12.



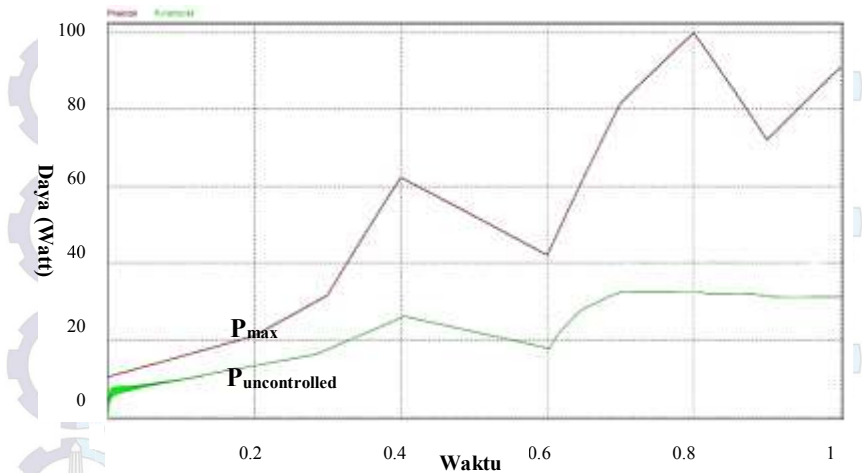
Gambar 4.12 Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 17,5 Ω

4.4 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Saat Beban 20 Ω

Pada simulasi selanjutnya, beban dinaikkan menjadi 20 Ω untuk mengetahui nilai daya keluaran baik tanpa MPPT maupun dengan MPPT. Penjelasan mengenai hasil simulasi dijelaskan pada bagian sub-bab berikut ini.

4.4.1 Analisis dan Perbandingan Daya Tanpa MPPT

Hasil simulasi PV tanpa MPPT pada beban 20 Ω ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik perbandingan $P_{\text{uncontrolled}}$ dan P_{\max} pada beban 20Ω

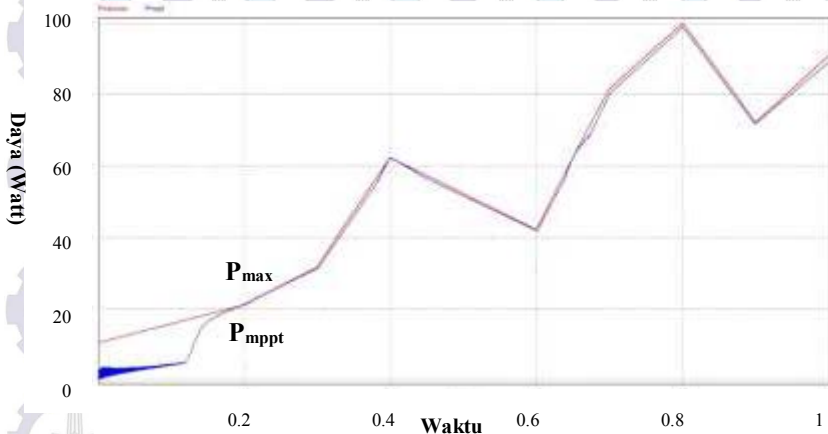
Data *error* daya ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut ini. Terdapat *error* yang cukup besar.

Tabel 4.8 Data *error* daya PV tanpa MPPT pada beban 20Ω

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	$P_{\text{uncontrolled}}$ (Watt)	P_{\max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{\max} - P_{\text{uncontrolled}}$)
100	9,4	10,3	0,90
200	10,3	20,9	10,60
300	11,1	31,8	20,70
600	28,3	62,2	33,90
500	19,2	52,2	33,00
400	16,1	42,1	26,00
800	33,8	81,7	47,90
1000	35,1	99,9	64,80
700	28,9	72,2	43,30
900	34,3	90,8	56,50

4.4.2 Analisis dan Perbandingan Daya Dengan MPPT

Hasil simulasi PV dengan MPPT pada beban $20\ \Omega$ ditunjukkan pada Gambar 4.14 berikut ini.



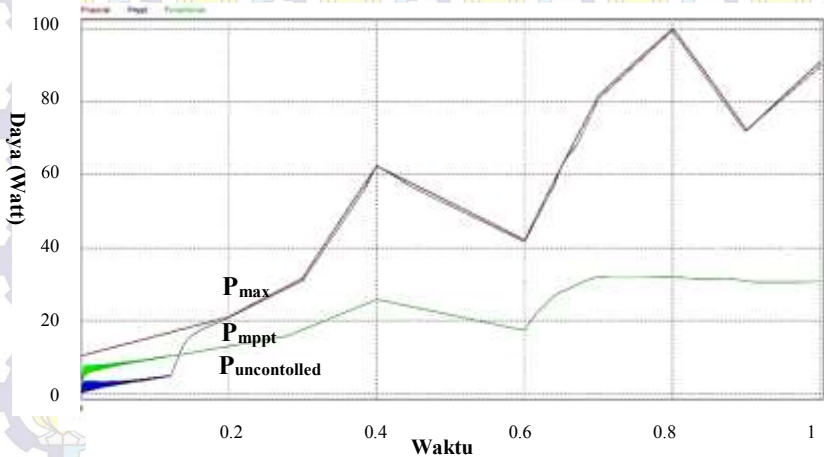
Gambar 4.14 Grafik perbandingan P_{mppt} dan P_{max} pada beban $20\ \Omega$

Data *error* daya PV ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut ini. Nilai *error* yang didapatkan antara 0,10 Watt – 2,6 Watt.

Tabel 4.9 Data *error* daya PV dengan MPPT pada beban $20\ \Omega$

<i>Irradiance</i> (Watt/m ²)	P_{mppt} (Watt)	P_{max} (Watt)	<i>Error</i> ($P_{max} - P_{mppt}$)
100	9,5	10,3	0,80
200	19,9	20,9	1,00
300	29,2	31,8	2,60
600	62,1	62,2	0,10
500	50,2	52,2	2,00
400	41,9	42,1	0,20
800	80,9	81,7	0,80
1000	99,5	99,9	0,40
700	71,7	72,2	0,50
900	89,1	90,8	1,70

Pada Tabel 4.9 dapat dijelaskan bahwa daya keluaran nilainya semakin berkurang jika dibandingkan dengan PV pada beban 17.5Ω . Hasil perbandingan antara daya keluaran PV dengan MPPT dan PV tanpa MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut ini.



Gambar 4.15 Grafik perbandingan $P_{uncontrolled}$, P_{mppt} , dan P_{max} pada beban 20Ω

Pada Tabel 4.9 dapat dijelaskan bahwa daya PV dengan MPPT cenderung dapat mengikuti nilai daya maksimal dari PV. Pada *irradiance* 300 Watt/m^2 didapatkan *error* daya sebesar 2,6 Watt dan pada *irradiance* 900 Watt/m^2 didapatkan *error* daya sebesar 1,7 Watt. Nilai daya tertinggi didapatkan ketika *irradiance* sebesar 1000 Watt/m^2 . Data perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan dengan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa MPPT dan PV dengan MPPT pada beban 20 Ω

4.5 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Pada Semua Nilai Beban

PV disimulasikan dengan berbagai macam nilai beban yang berubah ubah dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh nilai beban terhadap nilai daya keluaran. Beban yang digunakan yaitu 12.5 Ω , 15 Ω , 17.5 Ω , dan 20 Ω . Perbandingan nilai daya keluaran PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut ini.

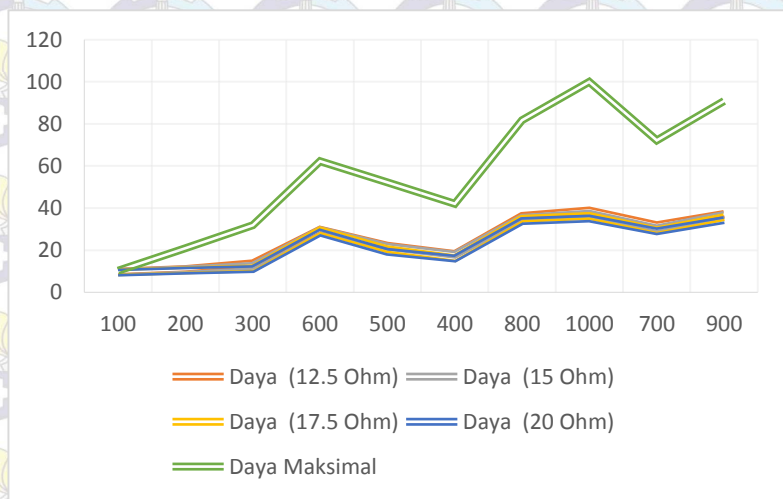
4.5.1 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Tanpa MPPT Pada Semua Nilai Beban

Daya keluaran PV tanpa MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut ini.

Tabel 4.10 Perbandingan daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

Irradiance (Watt/m²)	Daya (12,5 Ω)	Daya (15 Ω)	Daya (17,5 Ω)	Daya (20 Ω)	Daya Maksimal
100	9,8	9,7	9,5	9,4	10,3
200	11,1	10,9	10,5	10,3	20,9
300	13,7	12,5	11,3	11,1	31,8
600	29,7	29,6	29,5	28,3	62,2
500	22,1	21,6	20,5	19,2	52,2
400	18,2	17,9	16,2	16,1	42,1
800	36,2	35,3	34,9	33,8	81,7
1000	38,9	37,4	36,3	35,1	99,9
700	31,9	30,3	29,5	28,9	72,2
900	37,2	36,7	35,7	34,3	90,8

Grafik perbandingan nilai daya keluaran PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Gambar 4.17 berikut ini.



Gambar 4.17 Grafik perbandingan nilai daya tanpa MPPT pada semua nilai beban

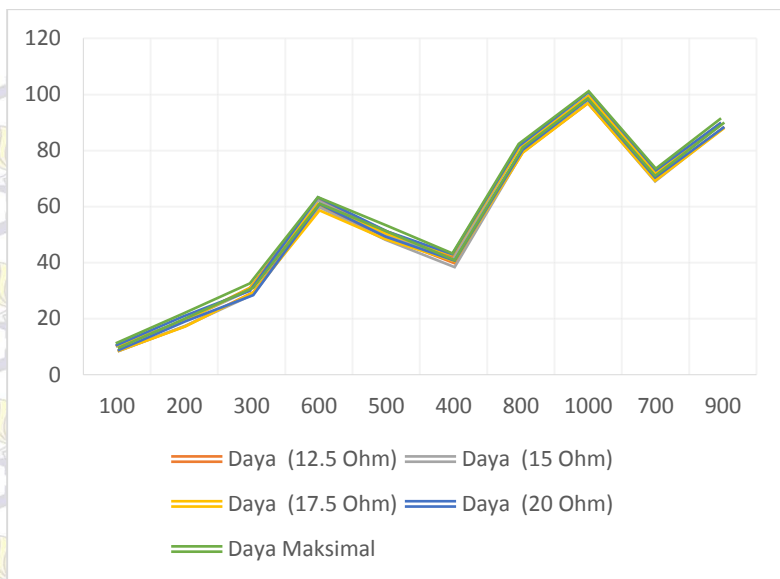
4.5.2 Analisis dan Perbandingan Daya Keluaran Dengan MPPT Pada Semua Nilai Beban

Daya keluaran PV tanpa MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.11 berikut ini.

Tabel 4.11 Perbandingan daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	Daya (12,5 Ω)	Daya (15 Ω)	Daya (17,5 Ω)	Daya (20 Ω)	Daya Maksimal
100	9,3	9,2	9,3	9,5	10,3
200	18,2	18,3	18,1	19,9	20,9
300	30,2	29,4	30,1	29,2	31,8
600	61,1	60,9	59,8	62,1	62,2
500	50,2	49,1	49,3	50,2	52,2
400	40,9	39,6	41,6	41,9	42,1
800	80,1	80,1	79,9	80,9	81,7
1000	98,2	98,3	98,2	99,5	99,9
700	70,9	70,3	70,5	71,7	72,2
900	89,1	89,2	88,8	89,1	90,8

Pada Tabel 4.11 dapat dijelaskan bahwa nilai daya keluaran mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya nilai beban. Pertambahan nilai beban juga mempengaruhi nilai daya keluaran PV dengan MPPT. Pertambahan beban ini juga akan mengubah nilai titik kerja maksimal (*Maximum Power Point*) dari PV. Nilai daya keluaran paling maksimal didapatkan ketika nilai *irradiance* paling maksimal juga yaitu 1000 Watt/m². Grafik perbandingan nilai daya keluaran PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Gambar 4.18 berikut ini.



Gambar 4.18 Grafik perbandingan nilai daya dengan MPPT pada semua nilai beban

4.6 Analisis dan Perbandingan *Error* Daya PV Pada Semua Nilai Beban

Analisis dan perbandingan *error* daya PV digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh MPPT dalam meningkatkan nilai *error* daya.

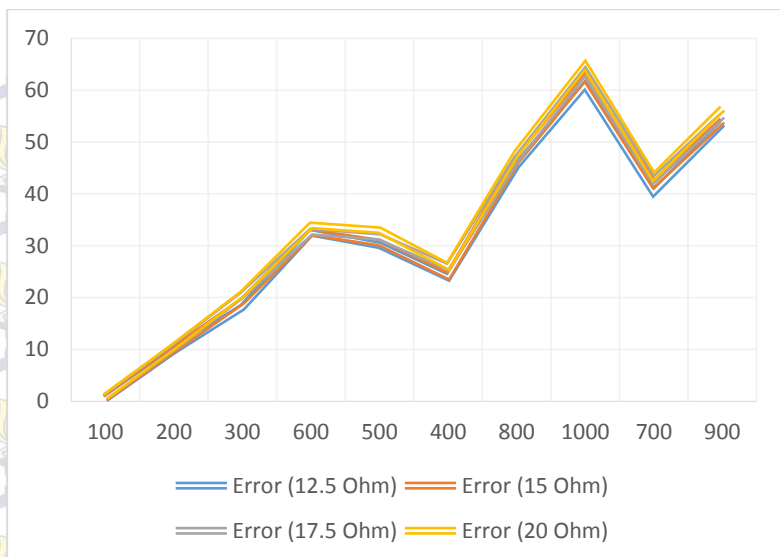
4.6.1 Analisis dan Perbandingan *Error* daya PV Tanpa MPPT Pada Semua Nilai Beban

Error daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.12 berikut ini.

Tabel 4.12 Data nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	<i>Error</i> (12,5 Ω)	<i>Error</i> (15 Ω)	<i>Error</i> (17,5 Ω)	<i>Error</i> (20 Ω)
100	0,5	0,6	0,8	0,9
200	9,8	10	10,4	10,6
300	18,1	19,3	20,5	20,7
600	32,5	32,6	32,7	33,9
500	30,1	30,6	31,7	33
400	23,9	24,2	25,9	26
800	45,5	46,4	46,8	47,9
1000	61	62,5	63,6	64,8
700	40,3	41,9	42,7	43,3
900	53,6	54,1	55,1	56,5
<i>Error</i> Rata-Rata	31,53	32,22	33,02	33,76

Nilai daya keluaran mengalami penurunan jika beban bertambah pada PV tanpa MPPT. Penurunan nilai daya dipengaruhi oleh bertambahnya beban pada PV. Penambahan beban berpengaruh pada penurunan nilai daya keluaran pada PV tanpa MPPT. Nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban antara 31,53 Watt – 33,76 Watt sehingga PV tidak dapat bekerja pada daerah maksimal. Grafik perbandingan *error* daya PV tanpa menggunakan MPPT ditunjukkan pada Gambar 4.19 berikut ini.



Gambar 4.19 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV tanpa MPPT pada semua nilai beban

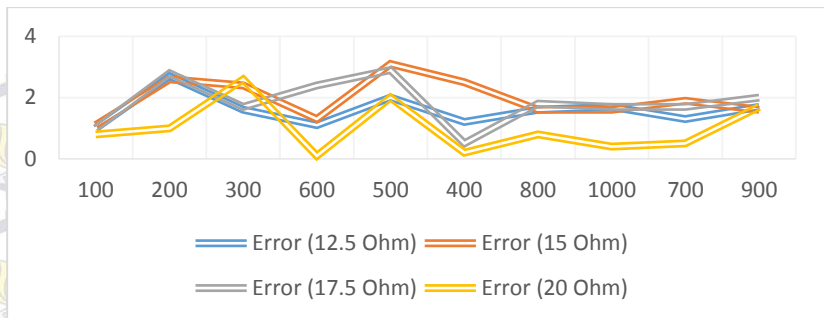
4.6.2 Analisis dan Perbandingan *Error* Daya PV Dengan MPPT Pada Semua Nilai Beban

Selanjutnya akan dibandingkan nilai *error* daya pada semua nilai beban. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan nilai beban terhadap nilai efisiensi PV pada tiap *irradiance*. *Error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Tabel 4.13 berikut ini.

Tabel 4.13 Data nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

<i>Irradiance</i> (Watt/m²)	<i>Error</i> (12,5 Ω)	<i>Error</i> (15 Ω)	<i>Error</i> (17,5 Ω)	<i>Error</i> (20 Ω)
100	1	1,1	1	0,8
200	2,7	2,6	2,8	1
300	1,6	2,4	1,7	2,6
600	1,1	1,3	2,4	0,1
500	2	3,1	2,9	2
400	1,2	2,5	0,5	0,2
800	1,6	1,6	1,8	0,8
1000	1,7	1,6	1,7	0,4
700	1,3	1,9	1,7	0,5
900	1,7	1,6	2	1,7
<i>Error</i> Rata-Rata	1.53	2.00	1.84	1.04

Pada Tabel 4.13 didapatkan bahwa nilai efisiensi rata-rata dari PV berubah seiring bertambahnya beban. Nilai *error* daya terendah didapatkan pada beban 20 Ω dan tertinggi pada beban 15 Ω . Pada beban 20 Ω didapatkan nilai *error* daya sebesar 1,04 Watt dan pada beban 15 Ω didapatkan nilai *error* daya sebesar 2 Watt. Pada beban 12,5 Ω didapatkan nilai *error* daya sebesar 1,53 Watt dan pada beban 17,5 Ω didapatkan nilai *error* sebesar 1,84Watt. Gambar grafik perbandingan nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban ditunjukkan pada Gambar 4.20 berikut ini.



Gambar 4.20 Grafik perbandingan nilai *error* daya PV dengan MPPT pada semua nilai beban

Dari Tabel 4.13 dapat dijelaskan bahwa nilai *error* daya PV dengan MPPT antara 1,04 Watt - 2 Watt sehingga nilai daya rata-rata yang dihasilkan PV antara 98 Watt – 98,96 Watt. Perubahan nilai beban mempengaruhi nilai daya keluaran dan *error* daya PV.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan simulasi Tugas Akhir yang telah dilakukan, diperoleh beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan sebagai berikut.

1. Perubahan nilai *irradiance* dan nilai beban pada PV dapat mempengaruhi nilai daya keluaran dan *error* daya yang dihasilkan.
2. Kinerja PV sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari (*irradiance*) dan beban sehingga dibutuhkan suatu metode untuk mengoptimisasi agar PV dapat bekerja pada daerah maksimal.
3. Proses optimisasi daya keluaran pada penelitian ini, digunakan metode *firefly algorithm*.
4. *Firefly algorithm* digunakan untuk menala parameter K_p , K_i , dan K_d pada *PID Controller*. Nilai K_p , K_i , dan K_d berubah-ubah sesuai dengan nilai beban pada PV.
5. Nilai *error* daya PV tanpa MPPT antara 31,53 Watt – 33,76 Watt. Sedangkan, nilai efisiensi rata-rata PV dengan MPPT antara 1,04 Watt - 2 Watt. Dalam hal ini, MPPT dapat bekerja cukup baik untuk meningkatkan nilai daya keluaran PV.

5.2 Saran

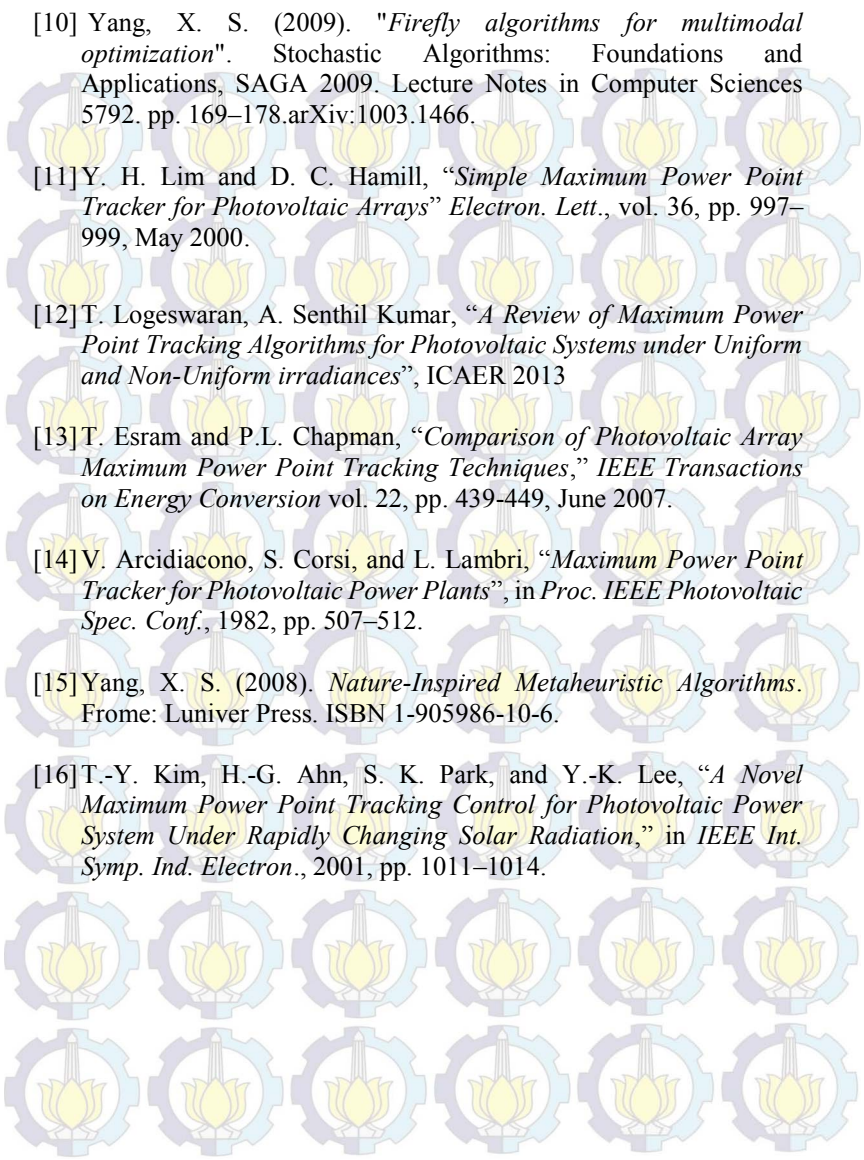
Saran yang dapat diberikan dalam perbaikan dan pengembangan lebih lanjut terhadap penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Selain metode penalaan *firefly algorithm* untuk menala *PID controller*, dapat juga digunakan metode kecerdasan buatan lainnya untuk mengetahui perbandingannya dengan metode *firefly algorithm* ini.
2. MPPT yang digunakan juga perlu diuji coba pada sistem yang lebih besar untuk dibandingkan dengan sistem yang digunakan pada penelitian ini.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi, "*Modern Power System Control*", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2009.
- [2] Imam Robandi, "*Desain Sistem Tenaga Modern: Optimasi, Logika Fuzzy, dan Algoritma Genetika*", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2006.
- [3] Ashari, Muhammad, "*Sistem Konverter DC, Desain Rangkaian Elektronika Daya*", ITS Press, Surabaya, 2012.
- [4] Seno Aji, "*Desain Dan Implementasi Kontrol Maximum Power Point Tracking (Mppt) Dengan Menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC) Pada Sistem Photovoltaic (PV) Solar Car*", Tugas Akhir, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia 2014.
- [5] Gilbert M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Stanford University, A John Wiley & Sons, Inc., Publication 2004
- [6] Ahmad El Khateb, Nasrudin Abdul Rahim, Jeyraj Selvaraj, "*Optimized PID Controller for Both Single Phase Inverter and MPPT SEPIC DC/DC Converter of PV*", IEEE, 2011
- [7] Dnyaneshwar S. Karanjkar, S. Chatterji, Shimi S. L, Amod Kumar, "*An Improved Current Feedback Based Maximum Power Point Tracking Controller for Solar Photovoltaic System*", ICMiCR, 2013
- [8] M.A.A. Mohd Zainuri, M.A.Mohd Radzi, Azura Che Soh, N.Abdul Rahim, "*Adaptive P&O-Fuzzy Control MPPT for PV Boost DC-DC Converter*", IEEE, 2012
- [9] P. Siva Subramanian and R. Kayalvizhi, "*An Optimum Setting of PID Controller for Boost Converter Using Bacterial Foraging Optimization Technique*", Springer, Jerman, 2013

- 
- [10] Yang, X. S. (2009). "*Firefly algorithms for multimodal optimization*". Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Sciences 5792. pp. 169–178. arXiv:1003.1466.
- [11] Y. H. Lim and D. C. Hamill, "Simple Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays" *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 997–999, May 2000.
- [12] T. Logeswaran, A. Senthil Kumar, "A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems under Uniform and Non-Uniform irradiances", ICAER 2013
- [13] T. Eswam and P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion* vol. 22, pp. 439–449, June 2007.
- [14] V. Arcidiacono, S. Corsi, and L. Lambri, "Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power Plants", in *Proc. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, 1982, pp. 507–512.
- [15] Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Frome: Luniver Press. ISBN 1-905986-10-6.
- [16] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, "A Novel Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic Power System Under Rapidly Changing Solar Radiation," in *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, 2001, pp. 1011–1014.

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan simulasi Tugas Akhir yang telah dilakukan, diperoleh beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan sebagai berikut.

1. Perubahan nilai *irradiance* dan nilai beban pada PV dapat mempengaruhi nilai daya keluaran dan *error* daya yang dihasilkan.
2. Kinerja PV sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari (*irradiance*) dan beban sehingga dibutuhkan suatu metode untuk mengoptimisasi agar PV dapat bekerja pada daerah maksimal.
3. Proses optimisasi daya keluaran pada penelitian ini, digunakan metode *firefly algorithm*.
4. *Firefly algorithm* digunakan untuk menala parameter K_p , K_i , dan K_d pada *PID Controller*. Nilai K_p , K_i , dan K_d berubah-ubah sesuai dengan nilai beban pada PV.
5. Nilai *error* daya PV tanpa MPPT antara 31,53 Watt – 33,76 Watt. Sedangkan, nilai efisiensi rata-rata PV dengan MPPT antara 1,04 Watt - 2 Watt. Dalam hal ini, MPPT dapat bekerja cukup baik untuk meningkatkan nilai daya keluaran PV.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dalam perbaikan dan pengembangan lebih lanjut terhadap penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Selain metode penalaan *firefly algorithm* untuk menala *PID controller*, dapat juga digunakan metode kecerdasan buatan lainnya untuk mengetahui perbandingannya dengan metode *firefly algorithm* ini.
2. MPPT yang digunakan juga perlu diuji coba pada sistem yang lebih besar untuk dibandingkan dengan sistem yang digunakan pada penelitian ini.

